



João Filipe Nabais Milheiro

Licenciado em Ciências de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Ferramentas de Apoio à Decisão na Eficiência Energética: Motores de Alto Rendimento e Variação Eletrónica de Velocidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor João Miguel Murta Pina, Professor Auxiliar,
FCT-UNL

Co-orientador: Bruno Espírito Santo, Mestre,
EDP Comercial

Júri

Presidente: Doutor José Almeida Vieira Coito, Professor Associado da FCT-UNL

Arguente: Doutor João Francisco Alves Martins, Professor Associado da FCT-UNL

Vogal: Doutor João Miguel Murta Pina, Professor Auxiliar da FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Ferramentas de Apoio à Decisão na Eficiência Energética: Motores de Alto Rendimento e Variação Eletrónica de Velocidade

Copyright © João Filipe Nabais Milheiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade, e aos quais estarei eternamente grato.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor João Murta Pina, pela sua orientação, opiniões e críticas durante a realização deste trabalho. Nunca esquecerei o voto de confiança.

À EDP Comercial e ao Eng. Bruno Espírito Santo agradeço a oportunidade de participar no projeto.

Não posso deixar de fazer um reconhecimento ao Eng. Carlos Bastos Pereira, meu tutor na EDP Comercial, pela disponibilidade demonstrada, ensinamentos, e por toda a confiança depositada. Um gestor e motivador de homens. Obrigado!

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa por todas as condições disponibilizadas ao longo do meu percurso académico, desde instalações ao corpo docente.

Ao Eng. António Abreu, por fazer renascer a minha paixão e curiosidade insaciável pela eletrotecnia. Rápida recuperação professor e amigo.

Aos meus amigos Fábio Faustino e Fábio Xavier por me ensinarem o que é a amizade.

A ti Andreia por que me ensinas todos os dias o que é o amor.

A ti avô Manuel. À minha família, mas especialmente aos meus pais. O vosso sacrifício não foi em vão! Amo-vos.

*“Success is not final, failure is not fatal: it is the courage to
continue that counts.”*

Winston Leonard Spencer-Churchill

RESUMO

Esta dissertação nasce de um trabalho realizado em colaboração com a UNINOVA e a EDP Comercial, no âmbito do projeto S2C 2.0 (*Save to Compete 2.0*), coincidente com o arranque do PPEC 2017/2018.

O *Save to Compete 2.0* vem reforçar a aposta do grupo EDP no digital, e na digitalização e aceleração de processos no contexto do negócio. Desta forma, através do S2C 2.0 passa a ser possível que um cliente, fornecendo um conjunto de pressupostos, submeta a sua candidatura a uma medida de eficiência energética, e possa concluir em tempo real acerca da viabilidade do seu investimento. A adjudicação do contrato relativo à intervenção é realizada *online*, provocando uma disrupção do paradigma tomado até então.

Nesta dissertação são desenvolvidas quatro ferramentas integradas na plataforma online S2C relativos às medidas referentes à substituição de eficiência padrão, por Motores de Alto Rendimento (IE3) e à aplicação de variação eletrónica de velocidade em sistemas de força motriz. Para cada medida são desenvolvidas duas ferramentas, uma detalhada e uma simplificada.

Neste trabalho é abordado o motor de indução trifásico, desde a sua constituição e princípio de funcionamento, até às diretivas europeias *Ecodesign* e ao panorama do mercado de motores.

A variação de velocidade em sistemas eletromotrizes é tratada com especial interesse, sendo feito um estudo acerca dos vários tipos de carga mecânica, e a forma como o seu comportamento varia com a velocidade do acionamento. Aprofunda-se o tema, abordando algumas aplicações presentes na indústria, com o intuito de particularizar a caracterização dos sistemas nos simuladores. Neste contexto as aplicações de bombagem e ventilação apresentam-se em destaque pelo forte potencial de poupança energética.

Palavras-chave: Motor de Alto Rendimento, Variação Eletrónica de Velocidade, Eficiência Energética ...

ABSTRACT

This thesis is developed in collaboration with UNINOVA and EDP Comercial, within the scope of the S2C 2.0 project (Save to Compete 2.0), coinciding with the start of PPEC 2017/2018.

Save to Compete 2.0 reinforces the EDP group's commitment to digital in the context of business process acceleration. In this way, through S2C 2.0 it becomes possible for a client, providing a set of assumptions, to submit his application to an energy efficiency measure, being able to conclude in real time about the feasibility of his investment. The award of the contract for the intervention is carried out online, causing a disruption of the paradigm taken until now.

In this thesis, four tools are developed, which are integrated in the S2C Online Platform regarding the measures related to the replacement of standard efficiency motors, by Premium Efficiency Motors (IE3) and the application of Variable Speed Drivers in motor systems. For each measure two tools are developed, one detailed and one simplified. One of the challenges is to develop a simplified model whose non-technical user is able to make a proposal correctly.

This work addresses the three-phase induction motor, from its constitution and operating principle, to the European Ecodesign directives and to the motor market.

The speed variation in motor systems is treated with special interest, and a study is made regarding the various types of mechanical load, and the way it behaves with the speed of the drive. The topic is explored, addressing some applications present in the industry, with the purpose of particularizing the characterization of the systems in the simulators. In this context pumping and ventilation applications are highlighted by the strong potential for energy savings.

Keywords: High Efficiency Motor, Variable Speed Driver, Energy Efficiency ...

ÍNDICE

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxiii
Siglas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos da Dissertação	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Máquina de Indução Trifásica	5
2.1.1 Constituição	5
2.1.2 Princípio de Funcionamento	7
2.1.3 Velocidade de Sincronismo e Número de Pares de Polos	8
2.1.4 Escorregamento	8
2.1.5 Métodos de Arranque	9
2.1.6 Características Nominais e de Serviço	14
2.2 O Motor de Alto Rendimento	19
2.2.1 Normas e Legislação	21
2.2.2 Considerações e Caracterização do Mercado e da Indústria	28
2.2.3 Considerações sobre <i>Downsizing</i> na Substituição de Motores	30
2.2.4 Rebobinagem	31
2.3 Variação de Velocidade em Sistemas Motrizes	31
2.3.1 Variação de Velocidade em Motores de Indução	31
2.3.2 Controlo de Velocidade através de Métodos Mecânicos	35
2.3.3 Controlo de Velocidade através de Acoplamento Eletromagnético ou <i>Eddy Current Clutch</i>	38
2.4 Tipos de Carga e Aplicações	39
2.4.1 Cargas de Binário Quadrático	41
2.4.2 Cargas de Binário Linear	43
2.4.3 Cargas de Binário Constante	44

2.4.4	Cargas de Potência Constante	46
2.4.5	Aplicações	47
2.5	Variador Eletrónico de Velocidade	67
2.5.1	Modulação por Largura de Impulso	69
2.5.2	Controlo V/f	70
2.6	Distorção Harmónica e Compatibilidade Eletromagnética	73
3	Metodologia	77
3.1	Motores de Alto Rendimento - Módulo Detalhado	78
3.1.1	Caracterização do Motor	80
3.1.2	Características de Operação	82
3.1.3	Caraterização do Cenário Atual	84
3.1.4	Caraterização do Cenário Futuro	85
3.2	Motores de Alto Rendimento - Módulo Simples	87
3.2.1	Caracterização do Motor	87
3.2.2	Características de Operação	88
3.2.3	Caraterização do Cenário Atual	88
3.2.4	Caraterização do Cenário Futuro	89
3.3	Variadores Eletrónicos de Velocidade - Módulo Detalhado	89
3.3.1	Caracterização do Motor	90
3.3.2	Características de Operação	91
3.3.3	Caracterização da Carga/Aplicação	91
3.3.4	Caraterização do Cenário Atual	92
3.3.5	Caraterização do Cenário Futuro	94
3.4	Variadores Eletrónicos de Velocidade - Módulo Simples	96
3.4.1	Caracterização do Motor	97
3.4.2	Características de Operação	98
3.4.3	Caracterização da Carga/Aplicação	98
3.4.4	Caraterização do Cenário Atual	98
3.4.5	Caraterização do Cenário Futuro	98
3.5	Análise Económica e <i>Procurement</i>	98
3.6	Reunião de Engenharia com Auditor	101
4	Implementação	103
4.1	Motores de Alto Rendimento - Módulo Detalhado	103
4.2	Motores de Alto Rendimento - Módulo Simples	107
4.3	Variadores Eletrónicos de Velocidade - Módulo Detalhado	109
4.4	Variadores Eletrónicos de Velocidade - Módulo Simples	114
4.5	Análise ao Modelo e Visualização Gráfica de Indicadores Relevantes . . .	116
4.5.1	Análise ao Modelo: MAR	116
4.5.2	Análise ao Modelo: VEV	121

5	Casos de Estudo	129
5.1	Simulação e Análise de Resultados: MAR	130
5.2	Simulação e Análise de Resultados: VEV	132
6	Conclusões	135
6.1	Principais Aspetos, Conclusões e Síntese de Resultados	135
6.2	Proposta de Trabalhos Futuros	142
	Bibliografia	143

LISTA DE FIGURAS

2.1	Vista explodida de um motor trifásico de rotor em gaiola.	6
2.2	Rotor em gaiola de esquilo.	6
2.3	Rotor bobinado com anéis coletores.	7
2.4	Corrente no Estator, Binário Eletromagnético e Velocidade mecânica do rotor em condição de arranque direto. Simulação em <i>SIMULINK</i> , para um motor através das especificações de um motor WEG 90kW.	11
2.5	Representação das grandezas elétricas em Estrela e Triângulo.	12
2.6	Curvas de rendimento em função da potência nominal para motores de 4 polos[27].	22
2.7	Vendas anuais entre 1998 e 2012, por classe IE, na indústria.	24
2.8	Análise do custo de ciclo de vida a 15 anos, para 2000h, 4000h, 6000h de funcionamento por ano (motor IE2, 11kW) [35].	28
2.9	Cota de consumo na indústria por tipo de aplicação [37].	29
2.10	Cota de consumo, de capacidade instalada e tempo de operação por intervalos de potência [37].	29
2.11	Previsão na evolução do mercado de motores [27].	30
2.12	Curvas de binário em função da velocidade, com variação da resistência rotórica (simulação efetuada em Matlab pelo autor).	33
2.13	Vista em <i>zoom</i> dos pontos de funcionamento do motor com a variação da resistência rotórica (simulação efetuada em Matlab pelo autor).	34
2.14	Curvas de binário em função da velocidade com diferentes tensões de alimentação (simulação efetuada em Matlab pelo autor).	34
2.15	Curvas de binário em função da velocidade com diferentes tensões de alimentação (zoom à imagem 2.14, e com simulação à tensão nominal U_s e a $0,4 \cdot U_s$) (simulação efetuada em Matlab pelo autor).	35
2.16	Curvas de binário em função da velocidade com diferentes frequências de alimentação com tensão de alimentação constante. (Estas curvas obtidas através do circuito de <i>Steinmetz</i> simplificado, não considera a saturação da máquina).	36
2.17	Sistemas de variação de velocidade por: a) polias fixas escalonares, b) polias cónicas, c) polias variadora de flanges cónicas [46].	37
2.18	Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de binário quadrático.	41

2.19 Andamento do binário em função da velocidade de rotação, em cargas reais de tipo binário quadrático.	42
2.20 Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de binário linear.	43
2.21 Andamento do binário em função da velocidade de rotação, em cargas reais de tipo binário linear.	44
2.22 Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de binário constante.	45
2.23 Andamento do binário em função da velocidade de rotação, em cargas reais de tipo binário constante.	46
2.24 Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de potência constante.	47
2.25 Gráfico com curvas características de um ventilador. a, ponto de funcionamento. P_a , pressão no ponto de funcionamento. η_a , rendimento no ponto de funcionamento. Q_a , caudal no ponto de funcionamento. H, altura do ventilador. $H_{sistema}$, curva característica de carga do sistema (adaptado de [50]). . .	49
2.26 Gráfico com curvas características de um ventilador com variação da velocidade de rotação e curvas características do sistema de ventilação, com a variação do estrangulamento. ($n > n_1 > n_2$) [50].	50
2.27 Dispositivos de regulação de caudal [51].	51
2.28 Curvas de potência em função da velocidade para diferentes dispositivos e técnicas de regulação de caudal.	52
2.29 Ponto de trabalho. Curva característica da bomba e do sistema.	54
2.30 Efeito do estrangulamento por válvula para regulação de caudal.	56
2.31 Efeito da redução de velocidade de rotação da bomba.	57
2.32 Efeito da redução da velocidade na curva característica da bomba, e na redução da sua eficiência.	58
2.33 Curvas de consumo em função do caudal.	58
2.34 Esteira transportadora [53].	59
2.35 Velocidade de rotação do moinho em função do número de revoluções completas desde o início da moagem. A vermelho a situação pré-intervenção, a traço negro a curva para a qual se obtém a otimização do processo com variação de velocidade (adaptado de [52]).	63
2.36 Representação da percentagem de matéria residual no peneiro em função das revoluções completas do moinho. A vermelho a evolução da percentagem de material com granulometria acima do pretendido para a situação pré-intervenção, a verde a curva com controlo de velocidade do moinho otimizado (Adaptado de [52]).	64
2.37 Representação de uma bobinadora. r_1 , raio interno. r_2 , raio externo. $r_b(t)$, raio adicional devido ao material bobinado em função do tempo. \vec{F} , força aplicada à tira. \vec{v} , velocidade linear [61].	65

2.38	Evolução do valor das grandezas de interesse para uma bobinadora do tipo axial, em função do tempo. (a) Velocidade linear do rolo [m/s]. (b) Força aplicada à tira [N]. (c) Velocidade angular [$rad s^{-1}$]. (d) Variação do raio adicional devido ao material bobinado [m]. (e) Potência eletromagnética desenvolvida [W]. (adaptada de [61])	67
2.39	Conversor de frequência [62].	68
2.40	Retificador implementado com tirístores, com controlo do ângulo de disparo [62].	68
2.41	Ondulador implementado com transístores e díodos de roda-livre [62]. . . .	69
2.42	Curvas de binário em função da velocidade com $U_s = U_n$ e frequência variável, ignorando-se o efeito de saturação (todo o traçado, além do correspondente à frequência nominal é teórico/fictício).	71
2.43	Representação da técnica V/f constante e técnicas derivadas.	72
2.44	Curvas de binário em função da velocidade. Simulação realizada através da estratégia apresentada em 2.43-a).	72
2.45	Curvas de binário em função da velocidade. Simulação realizada através da estratégia apresentada em 2.43-b).	72
3.1	Representação esquemática da abordagem inicial no planeamento dos modelos <i>Input-Output</i>	78
3.2	Representação esquemática do macro procedimento comum a todas as ferramentas.	79
3.3	Exemplo de uma chapa de características e informação disponível.	80
3.4	Esquema representativo da estratégia de caracterização do cenário atual. (O cliente escolhe entre duas alternativas para realizar a caracterização carga/-tempo do motor: *1-Desagregação por regimes e *2- Cálculo da potência média através de medições)	81
3.5	Exemplo da representação gráfica dos consumos atuais e futuros estimados, com base na definição dos regimes de carga para $n=10$ (Gráfico retirado de uma versão anterior da ferramenta.)	84
3.6	Exemplo da representação gráfica dos consumos atuais e futuros estimados, com base na definição dos regimes de carga para $n=10$ (Gráfico retirado de uma versão anterior da ferramenta.)	86
3.7	Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da energia consumida anualmente pelo sistema.	86
3.8	Representação esquemática relativa à caracterização do cenário atual, para efeitos de cálculo da energia consumida anualmente pelo sistema.	88
3.9	Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.	90
3.10	Representação esquemática relativa à caracterização do cenário atual, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.	92

3.11	Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.	95
3.12	Candidatura PPEC submetida em edições transatas, através do diretor de serviços.	96
3.13	Candidatura PPEC submetida em edições transatas, através do responsável de manutenção de sistemas.	97
3.14	Candidatura PPEC submetida em edições transatas, através do Eng. Eletrotécnico Responsável	97
3.15	Candidatura PPEC submetida em edições transatas, pelo Diretor de Serviços da empresa.	97
3.16	Representação esquemática relativa à caracterização do cenário atual, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.	99
3.17	Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.	100
4.1	Simbologia utilizada na representação dos esquemas de fluxo dos modelos. .	103
4.2	Representação esquemática do algoritmo implementado para o módulo MAR detalhado na situação em que o cliente procede a medições no terreno. . . .	104
4.3	Mapa de rendimentos construído com base nas expressões de cálculo para os requisitos mínimos de eficiência presentes nas normas IEC.	105
4.4	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo MAR detalhado na situação em que o cliente procede à caracterização dos regimes de carga.	106
4.5	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo MAR detalhado, na situação em que o cliente procede à caracterização dos regimes de carga.	107
4.6	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo MAR simplificado.	108
4.7	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo MAR simplificado.	109
4.8	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo VEV detalhado.	110
4.9	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo VEV detalhado.	111
4.10	Menu <i>Drop-down</i> para seleção da aplicação.	111
4.11	Menu <i>Drop-down</i> condicional, para seleção do método de redução de caudal (caso aplicação selecionada seja bombagem ou ventilação).	112
4.12	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo VEV Simples.	114
4.13	Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo VEV simplificado.	115

4.14	Custo de investimento em função da potência nominal	117
4.15	Diferença percentual na eficiência em função da classe de eficiência do motor presente na instalação em relação a IE3.	118
4.16	Preço por <i>kilowatt</i> de motores IE3 de 4 polos (custo total da medida).	118
4.17	Ganhos energéticos no <i>retrofitting</i> de motores IE3 de 4 polos em função da classe de eficiência do motor presente na instalação, para várias potências comercialmente disponíveis, para 5000 horas de operação anuais.	119
4.18	Payback simples em função da classe de eficiência do motor presente na ins- talação, para as várias potências nominais comercialmente disponíveis, para 5000 horas de funcionamento anual.	120
4.19	Payback simples em função do número de horas de funcionamento anual, motor 4 polos, IE1, com fator de carga médio de 60%.	121
4.20	Tempo de retorno de investimento em função do fator de carga.	121
4.21	Custo de investimento em função da potência nominal do VEV a instalar. . .	123
4.22	Custo da implementação da medida por <i>kilowatt</i> (€/kW).	123
4.23	Consumo energético em função do tempo de operação anual na situação atual (são representadas as simulações para o caso base 1.)	124
4.24	Consumo economizado, normalizado à potência nominal do VEV, para os três cenários de dimensionamento estudados.	125
4.25	Tempo de retorno de investimento para potências nominais menores que 30kW em função do tempo de operação anual.	126
4.26	Tempo de retorno de investimento em função do estado do dimensionamento das componentes de instalação, para potências nominais inferiores a 30kW. .	127
4.27	Tempo de retorno de investimento em função do estado do dimensionamento das componentes de instalação, para potências nominais superiores a 30kW. .	128
5.1	Tabela "Input" na ferramenta MAR Simples.	130
5.2	Tabela "Modelo" na ferramenta MAR Simples.	131
5.3	Tabela "Output" na ferramenta MAR Simples.	131
5.4	Tabela de "SaídaModelo" na ferramenta MAR Simples.	131
5.5	Tabela de "Inputs" na ferramenta VEV detalhado.	133
5.6	Tabela de "Modelo" na ferramenta VEV detalhado.	133
5.7	Tabela de "Modelo" na ferramenta VEV detalhado.	134
5.8	Tabela de "SaídaModelo" na ferramenta VEV detalhado.	134

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela comparativa para os métodos de arranque.	14
2.2	Classes Térmicas segundo [15].	16
2.3	Regimes de serviço [16].	17
2.4	Alterações em destaque à diretiva N.º640/2009	23
2.5	Comparação das principais características entre a norma IEC 60034-30-1:2017 e EcoDesign	24
2.6	Coeficientes de interpolação referentes aos limites mínimos de eficiência para cada classe IE e para diferentes números de pares de polos para motores $0,12kW \leq P_n \leq 0,74kW$ [31].	25
2.7	Coeficientes de interpolação referentes aos limites mínimos de eficiência para cada classe IE e para diferentes números de pares de polos para motores $P_n \geq 0,75kW$ [31].	26
2.8	Resumo de normas IEC para motores e variadores eletrónicos de velocidade [34].	27
3.1	Considerações sobre a degradação do rendimento a 30% da carga e sobre como este varia tendo em conta a classe de eficiência IE (IE1, IE2, IE3, IE4) e a potência nominal (15, 45, 132 kW). Estudo realizado para motores da linha WEG W22, carcaça em ferro fundido, frequência nominal 50Hz, 4 polos.	83
5.1	Dados de M&V retirados de um conjunto de relatórios de auditorias energéticas, considerando a implementação de medidas MAR.	130
5.2	Dados de M&V retirados de um conjunto de relatórios de auditorias energéticas, considerando a implementação de medidas VEV.	132

SIGLAS

AC *Alternating Current.*

B2B *Business-to-business.*

BJT *Bipolar Junction Transistor.*

BT *Baixa Tensão.*

CE *Comissão Europeia.*

CEMEP *European Committee of Manufacturers of Electrical Machines.*

DC *Direct Current.*

EC *European Commission.*

EDP *Energias de Portugal.*

EDPC *EDP Comercial.*

EMC *Electromagnetic Compatibility.*

EMI *Electromagnetic Interference.*

EN *European Norm/ European Standard.*

ERSE *Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.*

EuP *Energy-using Product.*

f.e.m. *Força Electromotriz.*

HF *High Frequency.*

IE *International Efficiency.*

IEC *International Electrotechnical Commission.*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor.*

IP Grau de proteção.

LF *Low Frequency.*

M&V *Measurement and Verification.*

MAR Motores de Alto Rendimento.

MEPS *Minimum Energy Performance Standard.*

MOSFET *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.*

MT Média Tensão.

NEMA *National Electrical Manufacturers Association.*

NTC *Negative Temperature Coefficient.*

PID *Proportional–Integral–Derivative.*

PO *Policy Options.*

PPEC Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica.

PTC *Positive Temperature Coefficient.*

PWM *Pulse Width Modulation.*

S2C *Save to Compete.*

SCR *Silicon Controlled Rectifier.*

TRE Técnico Responsável de Exploração.

VBA *Visual Basic for Applications.*

VEV Variadores Eletrônicos de Velocidade.

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Este trabalho nasce da participação num projeto levado a cabo pela [EDP Comercial](#) no âmbito do programa Save to Compete ([S2C](#)). Criado em 2012 este programa visa promover a competitividade das empresas em Portugal e Espanha através da implementação de soluções de eficiência energética.

O [S2C 2.0](#) traz como objetivo tornar acessível através de uma plataforma digital, de forma rápida e gratuita a adesão das empresas. Acedendo à plataforma [S2C 2.0](#), deve ser conferido às empresas o acesso a propostas com medidas de eficiência energética concretas e customizadas cliente a cliente. Adicionalmente, a plataforma deve permitir que o cliente observe em tempo real a validade e o potencial de poupança da sua proposta, permitindo se assim lhe aprouver, proceder à adjudicação online.

A implementação do [S2C 2.0](#) coincide com o lançamento do Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica ([PPEC](#)) 2017/2018 [1], vigorando este até fim de 2019.

O [PPEC](#), previsto no regulamento tarifário do setor aprovado pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos ([ERSE](#)), tem vindo a implementar no terreno ações que contribuem para a promoção da eficiência energética.

O [PPEC](#) tem como objetivo apoiar financeiramente medidas que visam a adoção de hábitos de consumo, de equipamentos mais eficientes, que promovam a eficiência energética e a redução do consumo de energia elétrica nos diferentes segmentos de consumidores.

As medidas [PPEC](#) são selecionadas por intermédio de concurso competitivo, onde a [EDP Comercial](#), no papel de promotora, viu aprovadas seis medidas no segmento da indústria, duas das quais se inserem no contexto deste trabalho: Motores de Alto Rendimento ([MAR](#)) e Variadores Eletrónicos de Velocidade ([VEV](#)).

Motores de Alto Rendimento e Variadores Eletrônicos de Velocidade dão nome a duas medidas de eficiência energética do tipo tangível, nas quais a ERSE e o Governo Português financiam a fundo perdido o custo de implementação até 51,1% no caso de MAR e 57,1% no caso dos VEV.

Estes incentivos concedidos pela ERSE constituem um fator impulsionador, tornando aliciente o investimento por parte das empresas (estimulando também de forma paralela, mercados periféricos).

Neste prisma, o volume de negócio gerado entre o promotor, o cliente, fornecedores e instaladores aumenta substancialmente, obrigando e criando a necessidade a nível de celeridade e simplificação de processos.

1.2 Objetivos da Dissertação

O trabalho realizado no âmbito da implementação do S2C 2.0, insere-se no desenvolvimento de uma plataforma digital *Business-to-Business* (B2B), com o intuito de proporcionar às empresas de uma forma simples e rápida um canal que permita que estas submetam candidaturas às diversas medidas de eficiência energética.

Estas candidaturas devem conferir às empresas o acesso a propostas customizadas cliente a cliente. É neste contexto que é proposta a construção de quatro módulos, referentes a MAR e VEV, com desenvolvimento de quatro modelos que constituem os alicerces de quatro ferramentas de cálculo integradas nos simuladores presentes na plataforma digital S2C, relativos às medidas já mencionadas.

Para cada uma das medidas (MAR e VEV), é proposto o desenvolvimento destas ferramentas na sua versão detalhada e na sua versão simplificada.

As ferramentas, partindo de um número de pressupostos fornecidos pelo cliente, devem ser capazes de gerar informação que permita concluir quanto à viabilidade técnico-económica da adoção de medidas relativas à substituição de motores de baixa eficiência ou eficiência *standard* por motores de eficiência *premium* e à aplicação de variação eletrónica de velocidade em sistemas de força motriz.

Na sua versão detalhada as ferramentas, com um conjunto mais alargado de pressupostos, devem permitir inferir acerca da viabilidade da implementação destas medidas com um grau de certeza e fiabilidade relativamente alto. A informação requisitada, necessária à simulação, pressupõe um maior conhecimento técnico por parte do quadro da empresa cliente.

Nas versões simplificadas, as ferramentas devem permitir que um cliente sem competências técnicas na área dos sistemas de força motriz, seja capaz de efetuar uma simulação sem que a complexidade do modelo o desencoraje a fazer, ou leve a um errado preenchimento da candidatura.

Assim, oferecendo ao cliente uma experiência menos complexa, pretende-se que a ferramenta mantenha um grau de compromisso entre simplicidade e precisão.

Como já foi referido os simuladores devem possibilitar a apresentação de propostas concretas, implicando inclusão de produtos recomendados e depois comercializados. Posto isto, o trabalho a nível de *procurement* toma um papel importante, obrigando à definição das características de produto a integrar as bases de dados da plataforma, com recurso a especificações técnicas e, numa segunda fase, avançando para a consulta a mercado por forma a construir bases de dados com preços e características de produto com o perfil definido e que integram a ferramenta.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos. O presente capítulo, Introdução, faz um breve enquadramento no que diz respeito aos elementos que constituem motivação para a realização desta dissertação, sendo expostos os objetivos propostos, as contribuições e a organização de cada um dos restantes capítulos.

No segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, é feito um estudo pormenorizado englobando todos os elementos eventualmente presentes num sistema de força motriz, com óbvio enfoque no motor de indução trifásico e nos variadores eletrónicos de velocidade, abordando o tema da variação de velocidade em sistemas de força motriz com especial atenção e interesse.

Mais se acrescenta, que se abordam temas tratados no decorrer dos trabalhos, essenciais à construção das ferramentas, não só numa perspetiva mais científica e tecnológica, mas também de um ponto de vista técnico-legal.

Faz-se ainda uma recolha das principais ferramentas de simulação no contexto do tema, disponíveis no mercado, em grande parte disponibilizados pelos principais fabricantes.

No terceiro capítulo, Metodologia, expõe-se a estratégia metodológica edificada, de uma forma concetual, com vista à construção dos modelos basilares ao simulador, assim como fatores que se revelam preponderantes na lógica algorítmica tomada. Sempre que se mostre pertinente, justificam-se convenientemente as decisões e particularidades presentes no planeamento estratégico.

No quarto capítulo, Implementação, apresenta-se de forma concretizadora a estrutura algorítmica implementada em cada um dos quatro simuladores, explicando de forma detalhada as características internas de cada modelo implementado. Posteriormente, procede-se à análise do modelo através de simulações e representando graficamente uma seleção dos resultados obtidos, permitindo daí retirar conclusões de interesse relativas ao modelo construído. Nesta análise começa por se fixar um ou mais casos base, procedendo então à variação de parâmetros de entrada.

No quinto capítulo, Casos de Estudo, procede-se à avaliação das ferramentas implementadas para ambas as medidas, tirando partido, para o efeito, da recolha de propostas

efetuadas em relatórios de M&V, provenientes de auditorias energéticas realizadas nalgumas das maiores empresas do setor industrial, no panorama nacional, visando a avaliação técnico-económica de intervenção referentes ao *retrofitting* de motores de eficiência *premium* e à aplicação de variação eletrónica de velocidade em sistemas de força motriz.

Recorrendo aos dados presentes nos relatórios mostram-se os resultados da simulação das ferramentas, mostrando também valores intermédios presentes internamente no modelo.

Faz-se ainda a análise e tomam-se considerações relativamente aos resultados obtidos. Por fim procede-se à inspeção do modelo através da extração de resultados gráficos provenientes das ferramentas, considerando aspetos de interesse.

No sexto capítulo, Conclusões, é realizado um balanço geral do trabalho desenvolvido, apresentando as principais conclusões obtidas no que diz respeito ao tema estudado. São também indicados os principais tópicos, cuja abordagem poderá constituir o alicerce de trabalhos futuros, não só no âmbito dos simuladores, mas também a nível processual na implementação das medidas (fluxo), e no estudo de aplicações no contexto industrial.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Máquina de Indução Trifásica

O motor de indução trifásico ou motor assíncrono trifásico, sendo uma máquina robusta, simples, eficiente, de elevada fiabilidade, é o motor mais comum em aplicações industriais e no setor terciário [2]. Apresenta relativo baixo custo face a outros tipos de motor, fácil instalação, e não possui escovas nem anéis coletores, implicando baixa necessidade de manutenção.

2.1.1 Constituição

Em termos constitutivos, a máquina assíncrona trifásica, na figura 2.1, apresenta dois componentes merecedores de principal relevo: o estator e o rotor.

O **estator**, a parte fixa da máquina, é constituído por chapas ferromagnéticas, com espessura de grandeza milimétrica, isoladas entre si de forma a mitigar as perdas por histerese e as correntes de Foucault. As chapas possuem ranhuras - “cavas” - que acolhem os enrolamentos estatóricos.

O rotor, a parte móvel, possui duas variantes:

O **rotor em gaiola**, também conhecido como rotor em gaiola de esquilo (figura 2.2) é de facto o de uso mais generalizado na indústria, sendo constituído por dois anéis condutores paralelos que curto-circuitam barras condutoras paralelas entre si e ao veio da máquina. As barras condutoras podem ser de cobre ou de alumínio.

No motor de indução com rotor em gaiola não existe qualquer conexão elétrica ao rotor, quer isto dizer que não são necessárias escovas ou anéis coletores - componentes naturalmente sujeitos a desgaste – o que representa uma vantagem a nível de manutenção [3]. Como desvantagem, este tipo de motor apresenta baixo binário de arranque quando comparado com os de rotor bobinado.

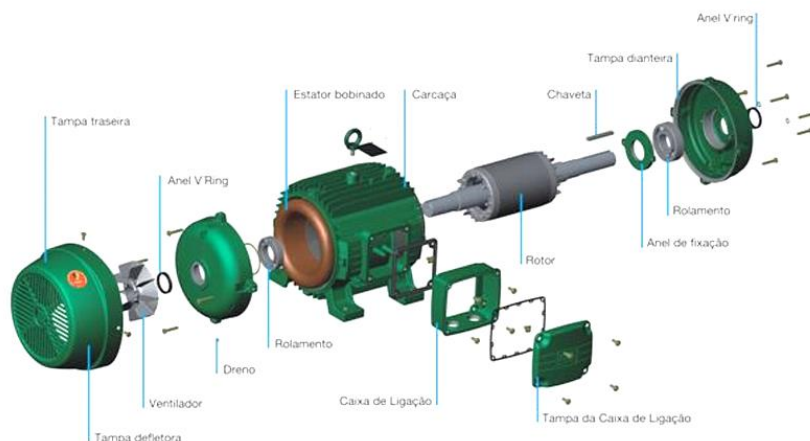


Figura 2.1: Vista explodida de um motor trifásico de rotor em gaiola.

Existem ainda variantes do rotor em gaiola de esquilo - o rotor de gaiola dupla e o rotor de gaiola de barras profundas – que devido à sua construção trazem benefícios a nível do binário de arranque [4].

O **rotor bobinado** (figura 2.3), que tal como estator, possui enrolamentos de cobre bobinados, é constituído por chapas de fina espessura. Estas bobinas encontram-se ligadas a anéis coletores metálicos (um anel por fase), que por sua vez estão instalados de forma coaxial ao veio e em contacto com escovas de carbono que por eles deslizam, constituindo caminho à passagem de corrente para o circuito exterior [2].

Este tipo de rotor é o menos comum em aplicações de uso geral, pois torna o produto final mais caro e mais carente de manutenção periódica (devido aos contactos por escovas).

O motor de rotor bobinado está normalmente associado à necessidade de arranque de cargas com elevado binário resistente e de grande inércia, portanto, a elevadas gamas de potência [5]. Através de resistências rotóricas variáveis, ligadas eletricamente em série e a jusante do contacto anel-escova, é possível obter arranques suaves, fornecer o binário

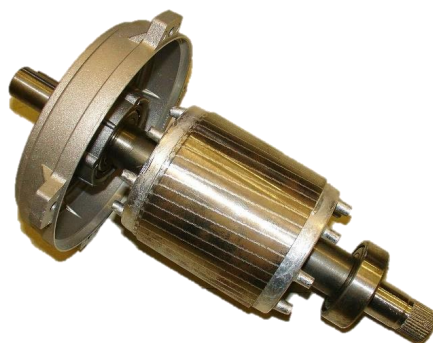


Figura 2.2: Rotor em gaiola de esquilo.

de arranque necessário à aplicação e obter um controlo preciso da corrente de arranque.

A **carcaça** da máquina, que pode ser fabricada em ferro fundido, aço ou alumínio, aloja o estator e o rotor do motor. Esta tem também como função, conferir robustez à máquina e proteger os componentes do motor de ambientes industriais mais adversos [5]. Normalmente, cabe à entidade que adquire o motor, a escolha do material da carcaça, tendo em conta que esta opção influi noutras características do motor, nomeadamente no rendimento, no peso ou no preço.

Os **rolamentos**, montados no eixo do motor, permitem que este gire [5]. Como tal, são um elemento ao qual deve ser dada especial atenção aquando da manutenção, sem a qual, se poderá incorrer em prejuízo à eficiência do motor. Na instalação e durante o tempo de operação do motor, os rolamentos devem ser lubrificados com intervalos de tempo que dependerão do seu tamanho, da velocidade de rotação e das horas de serviço anuais [6].

As **patas** ou as **flanges** funcionam como elemento de apoio e de fixação do motor. O seu tamanho e modelo é normalmente validado *in situ*, dependendo também, por exemplo, do sistema de acoplamento ou das condições espaciais do sistema acionado.

A caixa de ligações, também conhecida por **caixa de bornes**, permite internamente modificar o esquema de ligações dos enrolamentos do estator, e ao mesmo tempo receber os cabos de alimentação que chegam ao motor. A caixa poderá estar situada de um dos lados ou por cima do motor e, aquando a sua aquisição, deve ser acautelado qual a posição que melhor servirá as necessidades da aplicação ou permitirá contornar eventuais restrições espaciais ou posicionais.

Um **ventilador**, montado no eixo e no lado oposto à saída do veio está encarregue da refrigeração forçada do motor.

2.1.2 Princípio de Funcionamento

Os dois nomes mais comuns atribuídos à máquina tratada na presente dissertação – de indução ou assíncrona – não surgem ao acaso. Como já foi referido na secção anterior,



Figura 2.3: Rotor bobinado com anéis coletores.

o rotor desta máquina, fechado através de um circuito externo (rotor bobinado), ou em curto-circuito (rotor em gaiola), não é alimentado pelo exterior.

O estator, este sim alimentado por um sistema trifásico de tensões, dá origem a um campo girante ou um fluxo magnético girante, que se faz sentir através do entreferro, induzindo aos enrolamentos do rotor, de acordo com a Lei da indução ou lei de Faraday, uma força eletromotriz (f.e.m.). Estando o rotor curto-circuitado, a f.e.m., por sua vez, dá origem ao aparecimento de correntes rotóricas trifásicas, advindo daí a designação, máquina de indução.

De facto, os fenómenos são semelhantes ao de um transformador, mas no caso da máquina de indução, existe um enrolamento secundário rotativo, no qual a corrente apresenta uma frequência angular de escorregamento $s\omega$ (podendo a máquina ser modelada matematicamente através do esquema de *Steinmetz*).

As correntes que circulam no rotor originam um segundo campo magnético que é rebocado pela interação com o campo do estator, rodando estes, em sincronismo [7].

Embora haja sincronismo dos campos girantes do estator e do rotor, isto não acontece em relação ao rotor. O rotor do motor ¹ girará sempre a uma velocidade inferior ao do campo do rotor – que desliza sobre aquele e portanto não lhe é síncrono [7]. Por esta razão, esta máquina é também apelidada máquina assíncrona.

2.1.3 Velocidade de Sincronismo e Número de Pares de Polos

Chama-se velocidade síncrona n_s , à velocidade à qual roda o campo magnético girante. Esta depende do número de pares de polos e da frequência da tensão de alimentação. O seu valor pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (2.1)$$

Onde,

n_s - velocidade síncrona do campo girante (rpm);

f – frequência da corrente de alimentação (Hz);

p – número de pares de polos do motor.

Da expressão 2.1 torna-se trivial concluir que a velocidade do campo girante, e portanto do motor, pode ser alterada através da variação da frequência da onda de tensão, ou do número de pares de polos.

2.1.4 Escorregamento

Em 2.1.2, é dito que o rotor tem tendência a acelerar na direção do campo magnético girante, mas este nunca chegará a atingir a velocidade de sincronismo. Mesmo que o motor

¹Reforça-se o funcionamento da máquina como motor, no primeiro quadrante do referencial cartesiano $T(n_r)$, onde a velocidade do rotor é inferior à velocidade de sincronismo. O escorregamento virá sempre positivo.

trabalhe em condição de vazio, este terá que suprir a perdas mecânicas, por exemplo, por ventilação.

A diferença entre a velocidade síncrona n_s - do campo do rotor - e a velocidade do rotor em si n_r , é designada por escorregamento [8]. O escorregamento pode ser expresso em valores percentuais, ou tomando n_s como referência unitária:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100 [\%] \quad (2.2)$$

Onde,

s - escorregamento;

n_s - velocidade síncrona do campo girante (rpm);

n_r - velocidade do rotor (rpm).

Também se pode definir escorregamento pelas grandezas de rotação angulares:

$$s = \frac{\omega_s - \Omega}{\omega_s} \cdot 100 [\%] \quad (2.3)$$

Onde,

s - escorregamento;

ω_s - velocidade síncrona do campo girante (rads^{-1});

Ω - velocidade do rotor (rads^{-1}).

O escorregamento será muito baixo quando o motor se encontra em vazio e aumentará assim que a carga aumente.

Observando a equação 2.2, torna-se intuitivo assumir que, em condição de arranque, o escorregamento virá $s = 100\%$, ou $s = 1$, diminuindo progressivamente ². É ainda pertinente referir que, no geral, um motor de indução trabalhando à carga nominal, apresenta escorregamentos entre os 0.1% e 3% dependendo da sua potência nominal ³.

Se um rotor girar à velocidade de sincronismo, $s = 0$, verá o campo magnético parado. Desta maneira, não haverá variações de fluxo nem correntes no rotor. Não se produz binário.

2.1.5 Métodos de Arranque

Quando o estator, munido de enrolamentos trifásicos, é alimentado com uma tensão trifásica alternada sinusoidal, um campo girante rodará à velocidade síncrona, fazendo-se sentir nos condutores do rotor, através do entreferro.

²É condição para que o motor entre em funcionamento, que o seu binário de arranque, seja maior que o binário resistente (carga + atritos mecânicos)

³Principalmente em cargas de elevada inércia, o rotor poderá levar algum tempo a atingir a sua velocidade de operação. A baixa velocidade de rotação, os mecanismos de dissipação de calor não se mostram eficazes e com as fortes correntes rotóricas existe aquecimento dos enrolamentos [9]

Na condição de arranque, o rotor encontrando-se estacionário em relação ao fluxo girante, sofrerá indução de forças eletromotrizes, que darão origem a correntes rotóricas relativamente elevadas ⁴ - normalmente cerca de quatro a oito vezes superiores ao valor de corrente nominal da máquina - e de frequências muito próximas das correntes do estator. No instante inicial de arranque o escorregamento é unitário. Os valores de corrente de arranque poderão ser nefastos para a rede, para máquinas ⁵ em operação ou outras cargas na rede [10], provocando quedas de tensão, como para os cabos e aparelhos de ligação a montante do motor que são normalmente dimensionados para a sua operação nominal [5].

Como é possível observar pela equação 2.4, a corrente absorvida da rede, depende da tensão aplicada aos terminais dos enrolamentos do estator e das impedâncias complexas dos circuitos estatóricos e rotóricos. Uma das formas de limitar a corrente de arranque seria, aquando do projeto e construção da máquina, por exemplo, aumentar as características resistivas dos enrolamentos. No entanto, esta solução iria comprometer o binário de arranque do motor. Repare-se por exemplo, na equação 2.4, deduzida através do esquema de *Steinmetz*.

$$\overline{I_r^{arr}} = \frac{\overline{U_s}}{R_s + R_r + j(X_s + X_r)} \quad (2.4)$$

Nos motores de rotor bobinado com anéis coletores para acesso exterior, é possível atingir binários de arranque elevados, aumentando a resistência do rotor [11] e reduzindo, consequentemente, as correntes de arranque.

Nos motores de gaiola, que constituem o foco desta dissertação, esta prática não é possível, pois os condutores não se encontram acessíveis, sendo assim necessário recorrer a outros métodos disponíveis de forma a reduzir a intensidade de corrente no arranque. Estes métodos têm exatamente como fim reduzir a tensão aplicada aos terminais do estator, por forma a obter valores de intensidade de corrente mais baixos [2].

Há no entanto, que ter em conta, que o binário de arranque da máquina virá reduzido de uma quantidade proporcional ao quadrado da tensão. Para alguns tipos de carga mecânica, isto poderá constituir um problema e é por esta razão que este tipo de arranque é mais comum em motores de baixa potência.

⁴Principalmente em cargas de elevada inércia, o rotor poderá levar algum tempo a atingir a sua velocidade de operação. A baixa velocidade de rotação, os mecanismos de dissipação de calor não se mostram eficazes e com as intensas correntes rotóricas existe aquecimento dos enrolamentos [9].

⁵Sabendo que o funcionamento do motor de indução é especialmente sensível aos valores da tensão, uma grande corrente de arranque (pico de corrente, poderá significar problemas de queda de tensão.)

Arranque Direto

Quando a corrente de arranque não constitui um fator problemático para a rede, este é o método mais aconselhado [6], muito pela sua simplicidade. A máquina é alimentada diretamente da rede.

Há que garantir no entanto que não se verifiquem aquecimentos suscetíveis de degradar as canalizações, nem o disparo de equipamentos de proteção. É necessário ter especial atenção em casos em que os motores [12]:

1. Acionem cargas de grande inércia;
2. Estejam sujeitos a arranques lentos e em carga;
3. Tenham arranques frequentes;
4. Sejam de travagem ou inversão de marcha por contra corrente.

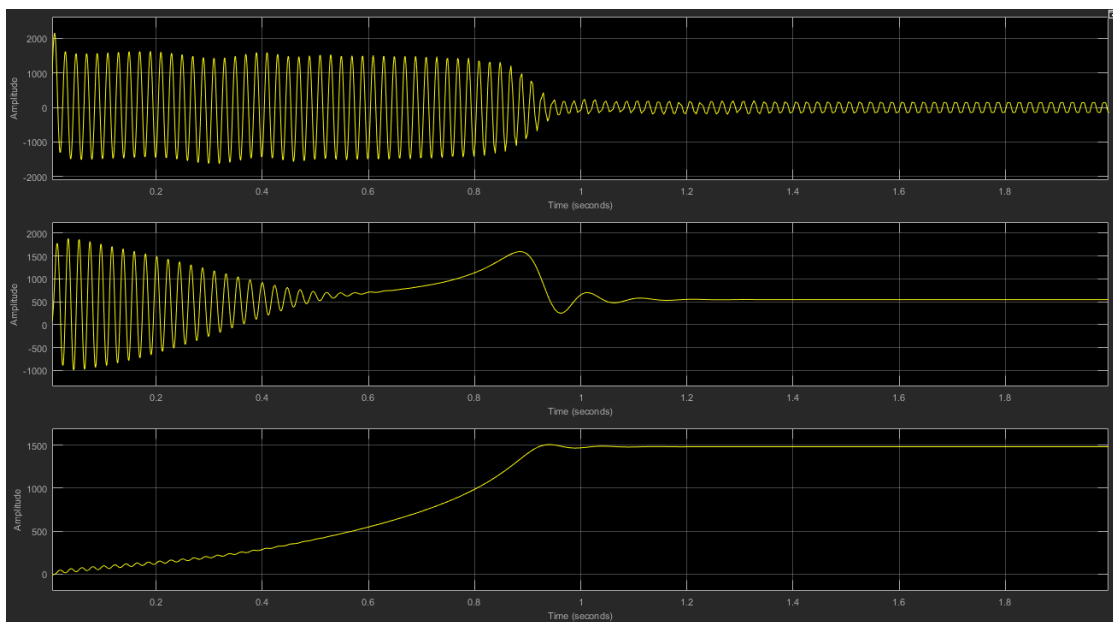


Figura 2.4: Corrente no Estator, Binário Eletromagnético e Velocidade mecânica do rotor em condição de arranque direto. Simulação em *SIMULINK*, para um motor através das especificações de um motor WEG 90kW.

Como o binário desenvolvido no momento do arranque pode ser elevado (observe-se a imagem 2.4, não se aconselha o método direto em certo tipo de aplicações, tais como monta-cargas ou tapetes transportadores, onde se pretende um arranque progressivo e suave [5].

Arranque Estrela-triângulo

No arranque estrela-triângulo, a configuração dos enrolamentos do estator é controlada através de um circuito composto por contactores eletromecânicos. No período de arranque, os enrolamentos estatóricos estão ligados em estrela, comutando depois para triângulo, figura 2.5, assim que o motor atinja uma determinada velocidade, $\approx 85\%$ [8].

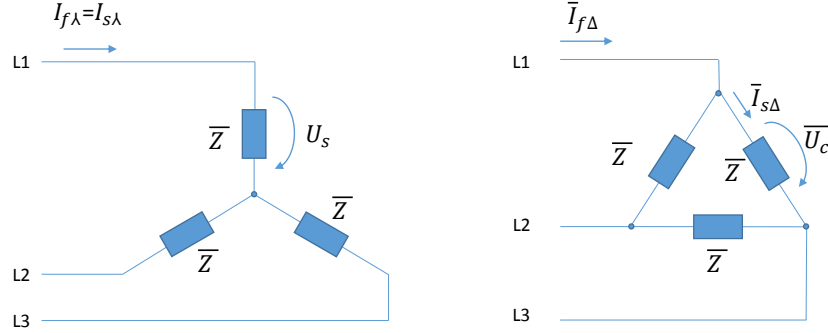


Figura 2.5: Representação das grandezas elétricas em Estrela e Triângulo.

Em triângulo, e da teoria dos circuitos trifásicos, é sabido que a corrente de fase $\bar{I}_{f\Delta}$, vem $\sqrt{3}$ vezes maior que a corrente no enrolamento do estator $\bar{I}_{s\Delta}$,

$$\bar{I}_{f\Delta} = \sqrt{3}\bar{I}_{s\Delta} \quad (2.5)$$

Como a tensão aos terminais do enrolamento será a tensão composta U_c , a corrente que percorre o enrolamento vem então,

$$\bar{I}_{s\Delta} = \frac{\bar{U}_c}{\bar{Z}} \quad (2.6)$$

Em estrela, a tensão aplicada por fase é a tensão simples - tensão fase-neutro - aos terminais dos enrolamentos da máquina. A corrente em cada enrolamento estatórico vem igual à corrente em cada uma das fases.

$$\bar{I}_{s\lambda} = \frac{\bar{U}_s}{\bar{Z}} = \bar{I}_{f\lambda} \quad (2.7)$$

Relacionando as correntes de fase $\bar{I}_{f\lambda}$ e $\bar{I}_{s\Delta}$, em ambas as configurações e atentando as equações 2.5, 2.6 e 2.7 é possível observar que a corrente absorvida da rede com a configuração em estrela vem reduzida de um fator de 3,

$$\frac{\bar{I}_{s\lambda}}{\bar{I}_{f\Delta}} = \frac{1}{3} \quad (2.8)$$

Como consequência, o binário que é proporcional ao quadrado da tensão aos enrolamentos da máquina, virá reduzido na mesma proporção, ou seja, um terço do binário de arranque da configuração triângulo, o que pode constituir um inconveniente dependendo do binário resistente de carga.

O arranque estrela-triângulo prima pelo baixo custo de implementação relativamente a outros métodos disponíveis, estando no entanto limitado a aplicações que não exijam um binário de arranque elevado, por exemplo, bombas ou máquinas ferramenta [8].

Arranque por Auto-transformador

Tal como no método de arranque estrela-triângulo, o processo de arranque por auto transformador passa também ele por duas fases distintas. Inicialmente o motor não se encontra diretamente ligado à rede elétrica, sendo alimentado por intermédio de um auto-transformador do tipo redutor [13]. Este equipamento permite controlar a tensão de alimentação aplicada aos enrolamentos da máquina, e desta forma a intensidade da corrente de arranque, através da regulação da sua relação de transformação, m .

O binário de arranque, sendo proporcional ao quadrado da tensão, tal como no arranque por estrela-triângulo, vem também ele reduzido, mas neste caso de um factor m^2 [13].

A limitação da corrente de arranque através de auto-transformador é mais comum em motores de elevada potência, acima de 18 kW [8], mas num espectro limitado de aplicações, de um modo geral, em ventilação e bombagem, cujo binário de arranque não se torna impeditivo [11].

Quando o motor atinge cerca de 80% da sua velocidade nominal, o auto-transformador é eletricamente “retirado” do circuito, passando a máquina a ser alimentada à plena tensão.

O custo deste tipo de solução constitui também uma desvantagem em relação ao método de arranque por estrela-triângulo, não só o custo do equipamento em si, mas também da aparelhagem acessória, por exemplo, haverá necessidade de instalar um quadro maior.

Soft-Starter

Os *soft-starters* ou arrancadores suaves, têm como principal função o controlo da tensão eficaz de alimentação do motor, com o intuito de lhe proporcionar um arranque suave. Nos dias de hoje, são dispositivos dotados de alguma inteligência, capazes de garantir, por um lado a limitação da corrente arranque ou um controlo eficaz a nível de binário, sendo até possível a programação do dispositivo consoante se deseje ou haja necessidade de atingir a velocidade nominal num espaço de tempo mais ou menos curto [11].

O uso do soft-starter é comum, por exemplo, em aplicações de bombagem, ventilação, ou esteiras transportadoras, cujo os perfis de operação não exijam variação de velocidade

ou não apresentem grandes oscilações em termos de perfil de carga, mas que no entanto, apresentem requisitos especiais no tempo de paragem e arranque, de uma forma contínua. Também permite realizar travagem dinâmica - soft-stop [11].

Na construção deste dispositivo são tipicamente usados tirístores associados antiparalelamente, que tiram partido da forma de onda da tensão da rede, beneficiando de uma comutação natural [11]. Isto torna os *soft-starters* relativamente competitivos a nível de mercado. Há ainda que realçar que o *soft-starting* também pode ser realizado através de Variadores Eletrónicos de Frequência, porém o custo de investimento associado a estes é muito maior. Os VEV serão discutidos em detalhe mais à frente nesta dissertação.

Não obstante as características vantajosas a nível de controlo de intensidade de corrente e do binário, são dispositivos que realizam comutações eletrónicas, injetando na rede conteúdos harmónicos de baixa ordem.

Assim que é atingida a velocidade desejada, o arrancador suave é retirado de funcionamento, por exemplo através de um mecanismo de bypass ou curto circuito, e os circuitos de comando são desconectados [11].

Na tabela 2.1, apresenta-se um comparativo entre algumas características pertinentes, de cada método.

Tabela 2.1: Tabela comparativa para os métodos de arranque.

Métodos de Arranque	Direto	λ / Δ	Auto-Transformador	Soft-Starter	VEV
Controlo de Binário/Velocidade	Não	Não	Não	Apenas no arranque e/ou paragem	Sim
Preservação da eficiência das engrenagens/correias	Não	Médio	Sim	Sim	Sim
Redução da corrente de arranque	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção do motor	C/ relé térmico	C/ relé térmico	C/ relé térmico	Sim	Sim
Melhoria do fator de potência (Regime Permanente)	Não	Não	Não	Não	Sim

2.1.6 Características Nominais e de Serviço

No decorrer dos trabalhos na EDP Comercial (EDPC), foram inúmeras as vezes em que se mostrou necessário identificar características dos produtos, neste caso os motores, não só no desenvolvimento dos simuladores, como em colaboração com a *Unidade de Procurement*, quer na conceção e revisão de Cadernos de Encargos e Acordos Quadro, quer em consulta a mercado.

Assim, tanto as características nominais, como outras características de serviço, tornam-se relevantes, para que se possa especificar a população de motores que integram a base de dados do simulador. Estas características são especificadas com fundo destacado a cinzento.

Neste subcapítulo, pretende-se dar esclarecimento acerca destas características, umas escolhidas no decorrer dos trabalhos, outras impostas por via normativa, indicando depois, em relação a cada característica, quais os motores escolhidos e que especificações se impõem. Muitos destes atributos técnicos estarão presentes nos modelos das ferramentas

desenvolvidas como *inputs* ou *outputs*.

Potência Nominal

A potência nominal é a potência que o motor, dentro das suas características nominais, e em regime contínuo está preparado para fornecer (à saída do veio, ou seja, potência mecânica) [14].

O conceito de potência nominal está intrinsecamente relacionado com o aumento da temperatura nos enrolamentos [14]. Na verdade, o motor é capaz de acionar cargas acima da sua potência nominal, no entanto, se for exigida ao motor uma potência acima da nominal, por um determinado tempo, a temperatura normal de serviço será maior que a recomendada, podendo causar uma diminuição do tempo de vida da máquina, a deterioração do seu rendimento, ou a destruição definitiva dos seus enrolamentos.

Há que ter em conta que a potência solicitada ao motor, é característica da carga e não da própria máquina. O motor, independentemente das suas características nominais, será impelido a fornecer a potência que pela carga lhe é solicitada.

No enquadramento do projeto S2C-2.0 e dos simuladores desenvolvidos, as potências nominais consideradas e lançadas em procurement, foram as que se seguem: 0.12kW, 0.18kW, 0.25kW, 0.37kW, 0.55kW, 0.75kW, 1.1kW, 1.5kW, 2.2kW, 3kW, 3.7kW, 4kW, 5.5kW, 7.5kW, 11kW, 15kW, 18.5kW, 22kW, 30kW, 37kW, 45kW, 55kW, 75kW, 90kW, 110kW, 132kW, 150kW, 160kW, 185kW, 200kW, 220kW, 250kW, 300kW, 315kW, 330kW, 355kW, 375kW.

Velocidade Nominal

É a velocidade em *rpm* do motor, quando a funcionar à potência, tensão e frequência nominais [14].

No enquadramento do projeto S2C-2.0 e dos simuladores desenvolvidos, as especificações técnicas consideradas, relativas à Velocidade Nominal foram lançadas em procurement referindo-se ao número de polos. Foram considerados motores de 2, 4, 6 e 8 polos.

Tensão Nominal

É a tensão para a qual o motor foi projetado. A grande maioria dos motores possuem tensão nominal múltipla, isto é, são fornecidos com diferentes tipos de ligações, que permitem o seu funcionamento com duas ou mais tensões [14].

Tabela 2.2: Classes Térmicas segundo [15].

Classe Térmica	Temperatura (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220

No enquadramento do projeto S2C-2.0 e dos simuladores desenvolvidos, as especificações técnicas de produto consideradas, relativas à Tensão Nominal foram lançadas em procurement com os seguintes requisitos:

1. 230/400V até 2.2kW;
2. 400/690V acima de 2.2kW.

Frequência Nominal

É a frequência da rede para o qual o motor foi projetado [14].

Um motor projetado para trabalhar nos 50 Hz, pode trabalhar numa rede de 60 Hz. Se a tensão se mantiver, manter-se-á a potência do motor e a corrente nominal e ocorrerá a diminuição da corrente de arranque, do binário de arranque e do binário máximo. A velocidade aumentará.

No enquadramento do projeto S2C-2.0 e dos simuladores desenvolvidos, foram considerados apenas motores de Frequência Nominal igual a 50Hz.

Classe Térmica

Num equipamento eletromecânico, a classe térmica representa a temperatura máxima que o equipamento pode atingir, à carga nominal, sem implicações no seu tempo de vida útil. Este limite de temperatura depende do material isolador e do sistema de isolamento utilizados [14].

Na tabela 2.2 apresentam-se as classes térmicas regulamentadas pela norma IEC 60085:2007 [15]:

No enquadramento do projeto S2C-2.0 e dos simuladores desenvolvidos, foram apenas considerados motores de classe térmica F.

Regime de serviço

Segundo [16], o regime de serviço tem que ver com o grau de regularidade e variabilidade da ou das cargas a que o motor é sujeito. Os motores de aplicação geral são normalmente projetados para regime contínuo, isto é, para carga constante, por tempo indefinido e igual à potência nominal do motor [14].

Na tabela 2.3, mostram-se os regimes de serviço e a sua designação.

Tabela 2.3: Regimes de serviço [16].

Regime de serviço	Designação
S1	Regime contínuo
S2	Regime de tempo limitado
S3	Regime intermitente periódico
S4	Regime intermitente periódico com arranques
S5	Regime intermitente periódico com frenagem elétrica
S6	Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente
S7	Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica
S8	Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação
S9	Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade
S10	Regime com cargas constantes distintas

Caso o comprador do equipamento não especifique qual o regime de serviço inerente à aplicação do motor, a norma IEC 60034-1 recomenda que seja fornecido um motor para regime contínuo, S1.

No enquadramento do projeto S2C 2.0 e dos simuladores desenvolvidos, foram apenas considerados motores preparados para regimes de serviço contínuo, S1.

Características de Ambiente**Altitude e Temperatura**

Segundo a norma [16], consideram-se as condições normais de serviço:

1. Altitudes não superiores a 1000 metros acima do nível do mar;
2. Meio Refrigerante, normalmente o ar ambiente, com temperatura não inferior a -20°C , não superior a 40°C e isento de elementos prejudiciais.

Dentro destes parâmetros, o motor deve garantir a entrega da sua potência nominal sem sobreaquecimento. Para valores fora destes limites de temperatura e altitude haverá uma degradação da potência útil, que é possível fornecer, vindo para efeitos de especificação, aplicar fatores corretivos.

Não se incluem, por exemplo, ambientes considerados agressivos como estaleiros, instalações portuárias, indústria pesqueira, química e petro-química, sujeitos a atmosfera explosiva e com alta humidade relativa.

No enquadramento do projeto S2C 2.0 e dos simuladores desenvolvidos, foram apenas considerados motores para operar em condições de altitude e temperatura normais, segundo a norma IEC 60034-1:2010^a.

^aÀ data da escrita desta dissertação, já se encontra em vigor a décima terceira versão desta norma: IEC 60034-1:2017.

Grau de Proteção

Conforme as características do local de instalação, o invólucro do equipamento deve estar dotado de um determinado grau de proteção, designado por índice de proteção. A Norma IEC 60034-5:2000 postula que o código relativo ao grau de proteção deve vir definido pela sigla **IP** seguida de dois algarismos numéricos.

O primeiro algarismo tem que ver com o grau de proteção de corpos sólidos estranhos, e o segundo com o grau de proteção contra a penetração de água no interior do motor.

No enquadramento do projeto S2C-2.0 e dos simuladores desenvolvidos, foram apenas considerados motores com índice de proteção IP55.

Proteção Térmica

Segundo [14], motores que funcionem em regime contínuo devem apresentar proteção contra sobrecargas. Os sensores mais utilizados no mercado são resistências Pt-100, termístores do tipo *Positive Temperature Coefficient (PTC)* e *Negative Temperature Coefficient (NTC)*, sensores térmicos bimetálicos ou fenólicos.

No enquadramento dos simuladores desenvolvidos, o dispêndio financeiro na aquisição destes sensores é tido em conta. É apenas considerada a aquisição de sonda PTC, para motores acima de 11kW.

No custo de investimento, na aquisição aos fornecedores, é tido em conta também:

- Custo adicional para fixação por flange ou patas e flange;
- Custo adicional para instalação de rolamentos isolados (Obrigatório acima de 75kW quando controlado por VEV);
- Adicional para acoplamento por transmissão por correias, incluindo veio reforçado em função da carga e respetivo rolamento de rolos Tipo NU, no Lado do Ataque - (LA-NU);

- Transporte do produto.

2.2 O Motor de Alto Rendimento

O motor assíncrono de rotor em gaiola de esquilo está presente na grande maioria dos acionamentos eletromecânicos aplicados em processos industriais.

Estima-se que na indústria, mundialmente, 80% a 90% da energia elétrica é consumida por sistemas eletromecânicos [17]. No caso dos Estados Unidos da América, da China ou do Canadá a fatia de energia consumida por sistemas acionados por motores de indução é, respetivamente 75%, 60%, 80%. Estes valores, claro está, variam de país para país, ou por exemplo, com o setor de atividade industrial.

Tendo em conta a grande fração de energia associada ao acionamento destes motores, é fácil perceber o potencial da influência que exerce uma pequena melhoria na eficiência destas máquinas. Uma otimização do rendimento do motor repercute-se numa diminuição impactante no consumo de energia.

De alguns anos a esta parte, com a crescente preocupação com a racionalização de recursos energéticos, têm vindo a ser impostos novos critérios, tanto no que concerne ao desenho e projeto das máquinas, como com normas que privilegiam a otimização dos rendimentos [18]. Esta mudança de paradigma impulsionou os mercados dos chamados Motores de Alto Rendimento, ou motores de eficiência *premium*.

O motor assíncrono é, à partida considerado, uma máquina com níveis de eficiência, relativamente, muito elevados [19], de 80% a 96% (dependendo da potência nominal da máquina), que ao longo dos tempos foram sofrendo melhorias, ou otimizações, no que toca ao design, quer construtivo e geométrico, quer no que tem que ver com os materiais utilizados.

O rendimento de uma máquina está indissociavelmente relacionado com as suas perdas, e é na mitigação destas perdas que se deve atacar com vista à otimização energética.

Segundo o *standard IEEE 112-B*, as perdas dividem-se da seguinte forma:

$$\Delta P_{str} = P_{in} - P_{out} = \Delta P_{el1} + \Delta P_{el2} + \Delta P_{core} + \Delta P_{mech} \quad (2.9)$$

Será necessário, por forma a reduzir a potência de perdas da máquina ΔP_{str} e obter benefício associado ao aumento de eficiência, atuar sobre a origem das perdas a nível individual.

As **perdas por efeito de joule** ou perdas resistivas, que ocorrem nos enrolamentos do estator ΔP_{el1} ou nas barras do rotor ΔP_{el2} de um motor de rotor de gaiola de esquilo, estão intimamente relacionadas com os valores de densidade de corrente. Para um maior valor de densidade de corrente, vem indissociavelmente um maior valor de perdas associadas. A redução destas perdas é conseguido, nos Motores de Alto Rendimento através do

aumento da área de secção dos enrolamentos condutores (nos motores padrão, é apenas usado o volume de cobre necessário para a potência que se pretende), reduzindo assim a resistência elétrica nos enrolamentos entre 35% e 40% [20], implicando também alterações na geometria das cavas. O aumento da eficiência do motor pode também ser obtido privilegiando o uso do cobre sobre o alumínio nas barras do rotor [21]. Com a utilização do cobre na gaiola, obtém-se uma diminuição do momento de inércia do rotor. Ainda assim, alguns fabricantes conseguiram atingir a classificação IE4 em motores de indução com rotores de alumínio.

Há que ter em atenção, que um aumento da área de secção dos condutores, assim diminuindo a resistência do estator e do rotor, acarretara para estes motores, e para a mesma carga, uma diminuição do binário de arranque e uma maior corrente de arranque.

As **perdas magnéticas** ΔP_{core} , que ocorrem maioritariamente por histerese ou devido a correntes de Foucault variam com a densidade de fluxo e com a frequência de alimentação. Estas perdas podem ser reduzidas através do aumento do comprimento e secção do ferro no estator e no rotor. De facto, os Motores de Alto Rendimento na grande maioria dos casos apresentam-se com tamanhos superiores aos motores padrão.

Na mitigação das perdas por histerese, também são usados aços melhorados do tipo magnético, por exemplo aço de silício, com baixa percentagem de impurezas[22][20]. As correntes de Foucault são minimizadas pelo uso de lâminas ferro-magnéticas de espessura muito reduzida, com isolamento interlaminar melhorado.

Minimizando o tamanho do entreferro, obtém-se um aumento da intensidade de fluxo magnético, aumentando assim a capacidade do motor fornecer o mesmo binário com menos potência absorvida. O mesmo efeito pode ser conseguido aumentando o comprimento do rotor e do estator.

As perdas magnéticas, também podem ser minimizadas pela inovação ou otimização dos processos de fabrico, por exemplo, métodos de corte menos agressivos para as propriedades do material magnético [23]. No entanto, muitas técnicas inovadoras não são aplicáveis na produção em massa, devido ao custo financeiro e acrescida morosidade.

Em suma, o foco do fabricante passa por obter um produto com elevada permeabilidade magnética.

Este é um dos principais fatores que influenciam o custo de fabrico, e claro, a disparidade de preços entre motores mais ou menos eficientes, em média na ordem dos 15% a 30% [24].

As **perdas mecânicas** ΔP_{mech} , são geradas principalmente pela ventilação e pelo atrito nos rolamentos, e daí a importância de uma manutenção ativa. Estas perdas são minimizadas através de design optimizado nos sistemas de ventilação e rolamentos de baixa fricção [22].

Os fabricantes que, em tempos, trabalharam a máquina, de um ponto de vista económico em detrimento do ponto de vista da eficiência energética [19], e não obstante os rendimentos de valor elevado já alcançados, continuam a concentrar os seus esforços com vista à melhoria contínua da eficiência, incentivados, em boa parte, pelas imposições

normativas. A União Europeia (e todo o mundo) continua a legislar neste setor, propondo classes de eficiência cada vez mais ambiciosas. Nos dias de hoje, os fabricantes apresentam uma oferta de motores com rendimentos padrão, possuindo paralelamente gamas de Motores de Alto Rendimento.

Um Motor de Alto Rendimento oferece não só um rendimento acima do padrão, mas traz benefícios inerentes ou derivados da sua utilização ou substituição de um motor de mais baixa eficiência, entre quais:

1. Permitem reduzir o consumo de energia elétrica, mantendo a eficácia;
2. Fatores de potência mais elevados, independentemente do fator de carga;
3. Apresentam temperaturas de operação menores, trazendo benefícios a nível do seu tempo de vida.

Em relação ao motor de rendimento padrão, os MAR, como já foi referido, pelo facto de possuírem uma resistência estatórica mais baixa, tendem a apresentar correntes de arranque mais elevadas, fator que se pode considerar menos vantajoso e deve ser tido em conta.

2.2.1 Normas e Legislação

A importância dos motores como consumidor de energia há muito tempo que é conhecida. Sendo os motores trifásicos em gaiola de esquilo, de longe, os mais presentes na indústria, é natural que sobre eles recaia a necessidade mais urgente de regulação, e uma prioridade em relação à normalização e harmonização do mercado. Por outro lado, a política ambiental europeia dá relevo à importância do uso sustentável de recursos.

Grande parte das economias mundiais adotam medidas regulatórias voluntárias ou obrigatórias, onde definem *standards* com o intuito de incentivar e regular o fabrico, testes, procedimentos, venda e uso de motores.

Em 1998, o *European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics* (CEMEP), a Comissão Europeia, em conjunto com 36 fabricantes de motores entram em acordo, definindo três níveis de eficiência (este acordo era de cariz voluntário):

EFF1 - (Equivalente ao IE2 em IEC 60034-30-1);

EFF2 - (Equivalente ao IE1 em IEC 60034-30-1);

EFF3 - (Classe abaixo dos níveis de eficiência padrão, também tratada como IE0).

Em 2001, a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) publica os primeiros critérios para motores de alta eficiência [19].

Embora com resultados positivos, a penetração dos produtos de alta eficiência foi ainda modesta até ao término do acordo em 2009.

Em 2008, o estudo de uma comissão científica LoT11 [EuP](#), vem reforçar a importância da introdução de *Minimum Energy Performance Standards (MEPS)*, com a diretiva EcoDesign 2009/125/EC [25][26]⁶.

Em 2009, é adotada a regulação [EC](#) N.º 640/2009 (sendo mais tarde retificada pela regulação [EC](#) No[4/2014]⁷), que especifica os requisitos para motores elétricos e uso de dispositivos de eletrônica de potência para variação de velocidade.

O IEC especifica atualmente, quatro classes de eficiência *International Efficiency (IE)* para motores, como representado na figura 2.6. São elas:

1. **IE1** - *Standard efficiency*;
2. **IE2** - *High efficiency*;
3. **IE3** - *Premium efficiency*;
4. **IE4** - *Super Premium efficiency (introduzida em 2014)*;

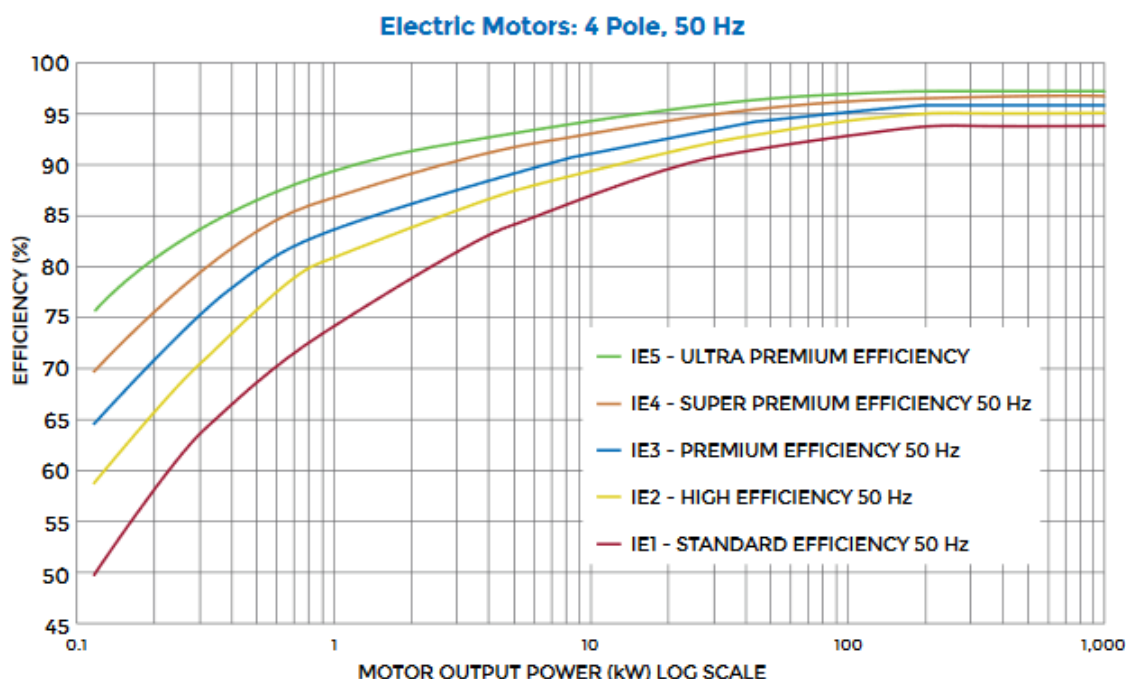


Figura 2.6: Curvas de rendimento em função da potência nominal para motores de 4 polos[27].

Os níveis de eficiência dos IE4 foram considerados pelos fabricantes como muito difíceis de atingir, dando origem à discussão sobre possíveis tecnologias que permitissem alcançar estes padrões [19][28].

⁶A diretiva *EcoDesign* é um instrumento legal responsável por estruturar e definir regras, legislação em produtos, harmonização de *standards*, inspecionar e regular o mercado

⁷As retificações que advieram desta emenda não foram consideradas nos documentos contratuais referentes ao PPEC e S2C 2.0, sendo estes referentes à regulação [EC](#) No [640/2009]

É prevista a entrada em vigor de uma nova classe de eficiência (IE5) na próxima edição da norma, onde se prevê e se pretende reduzir as perdas em 20% em relação aos IE4.

A diretiva europeia *EcoDesign*, referente à conceção ecológica de produtos 2009/125/CE [25], foi adotada para o direito nacional através do decreto de lei nº12/2011 de 24 de Janeiro. Deste modo, os regulamentos fixados pela Comissão Europeia (CE) anteriormente referidos encontram-se em vigor em território nacional.

A regulação CE N.º640/2009 [29], adota propostas presentes na norma IEC 60034-30. A regulação CE N.º4/2014 [30] traz alterações à anterior, como é possível observar pela tabela 2.4.

Tabela 2.4: Alterações em destaque à diretiva N.º640/2009

A regulação original EC No[640/2009], excluía os seguintes motores relativamente aos EU MEPS:	Mudança decorrente da regulação EC No[4/2014]:
Motores projetados para operar totalmente emersos em líquido.	especificados para operar
Motores completamente integrados num produto onde a performance energética do motor não pode ser testada separadamente;	
Motores especificamente projetados para operar:	especificados para operar exclusivamente:
Em altitudes superiores a 1000m;	4000m;
Fora de temperaturas ambiente $-15^{\circ}\text{C} < T_{amb} < +40^{\circ}\text{C}$;	$-30^{\circ}\text{C} < T_{amb} < +60^{\circ}\text{C}$;
Em temperaturas de operação máximas acima dos 400°C;	Não alterado;
Em atmosferas potencialmente explosivas definidas na Diretiva 94/9/EC;	Não alterado;
Motores-Freio.	Não alterado.
Informação obrigatória na chapa de características do motor:	
Os fabricantes devem apresentar a eficiência a 100%, 75% e 50% da carga nominal.	No caso de pequenos motores, onde a placa de características é de pequenas dimensões, apenas é obrigatória a apresentação do rendimento a 100% da carga nominal.

Os MEPS, relativos às classes de eficiência de motores, entram então em vigor, em três fases distintas [29]:

1. **16 de Junho de 2011** - Todos os motores abrangidos pela legislação devem possuir classe de eficiência não inferior a IE2;
2. **1 de Janeiro de 2015** - motores com $7,5\text{kW} \leq P_n \leq 375\text{kW}$ não devem possuir classe de eficiência inferior a IE3 ou IE2 quando acionado por VEV (IE2 + VEV);
3. **1 de Janeiro de 2017** - Todos os motores com $0,75\text{kW} \leq P_n \leq 375\text{kW}$ não devem ser menos eficientes do que IE3 ou IE2 + VEV.⁸

É possível observar o impacto da regulamentação na figura 2.7. A “mancha” lilás em destaque, permite inferir que os motores IE1 têm, atualmente, forte expressão presencial na indústria.

⁸Em vigor à data atual.

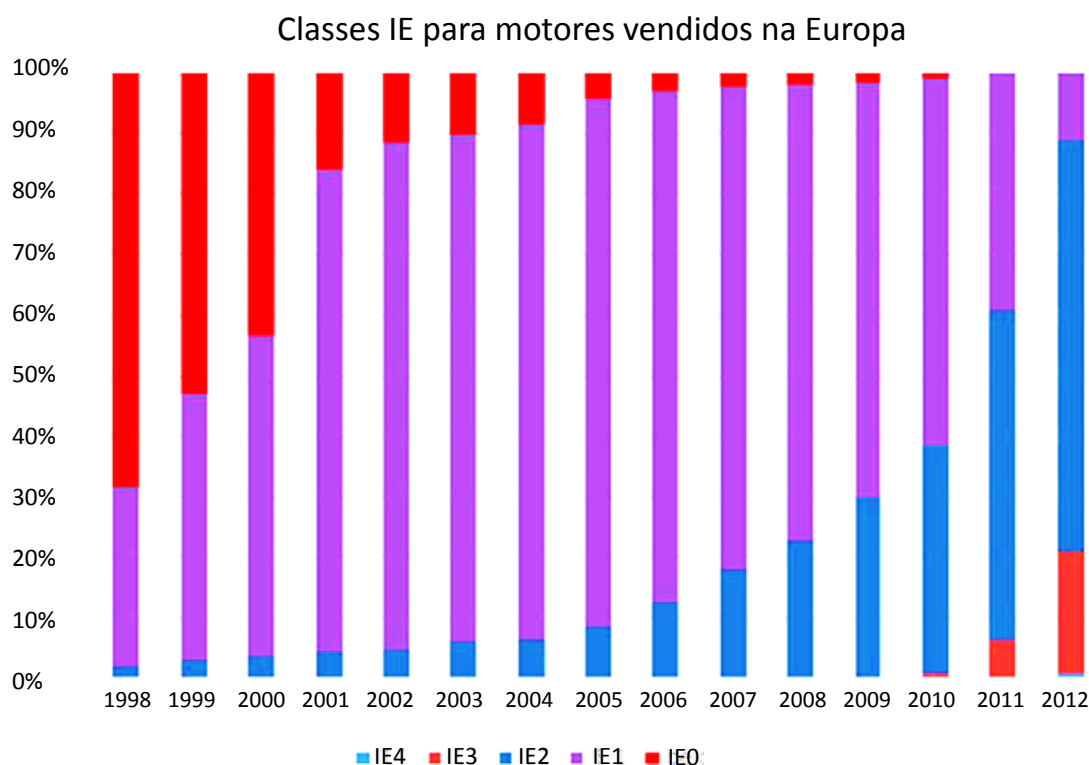


Figura 2.7: Vendas anuais entre 1998 e 2012, por classe IE, na indústria.

Tabela 2.5: Comparação das principais características entre a norma IEC 60034-30-1:2017 e EcoDesign

IEC 60034-30-1	EU EcoDesign [EC N°640/2009] [EC N°04/2014]
$0,12\text{kW} < P_n < 1000\text{kW}$	$0,75\text{kW} < P_n < 375\text{kW}$
2, 4, 6, 8 polos	2, 4, 6 polos
$U_n \leq 1000\text{V}$	$U_n \leq 1000\text{V}$
$-20^\circ\text{C} < T_{amb} < +60^\circ\text{C}$	$-30^\circ\text{C} < T_{amb} < +60^\circ\text{C}$
$H < 4000\text{m}$	$H < 4000\text{m}$

É um facto que, as normas que cada país adota, são um conjunto mais restrito do que as presentes nas normas IEC. A tendência é, no entanto, para que as diretivas nacionais, ou europeias, se venham atualizando e convergindo para as recomendações presentes nas normas IEC.

A tabela 2.5 dá conta das principais desigualdades entre a diretiva *EcoDesign* e as normas IEC.

No *standard* IEC 60034-30-1 [31] são definidos os valores mínimos para os rendimentos que definem as classes IE. Estes limites normativos de eficiência podem ser obtidos através de uma equação interpoladora.

Para determinar os limites de eficiência nominal a 50Hz com potências nominais entre 0,12kW e 200kW⁹, tira-se partido da seguinte equação [31]¹⁰.

$$\eta_n = A \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{P_n}{1kW} \right) \right]^3 + B \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{P_n}{1kW} \right) \right]^2 + C \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{P_n}{1kW} \right) \right] + D \quad (2.10)$$

Os coeficientes de interpolação referentes a motores de 0.12kW até 0.74kW são apresentados na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Coeficientes de interpolação referentes aos limites mínimos de eficiência para cada classe IE e para diferentes números de pares de polos para motores $0,12kW \leq P_n \leq 0,74kW$ [31].

Classe IE	Coeficientes	8 polos	6 polos	4 polos	2 polos
IE1	A	0.0786	0.0786	0.5234	0.5234
	B	-3.5838	-3.5838	-5.0499	-5.0499
	C	17.2918	17.2918	17.418	17.418
	D	72.2383	72.2383	74.3171	74.3171
IE2	A	6.4855	-15.9218	17.2751	22.4864
	B	9.4748	-30.258	23.978	27.7630
	C	36.852	16.6861	35.5822	37.8091
	D	70.762	79.1838	84.9935	82.458
IE3	A	-0.5896	-17.361	7.6356	6.8532
	B	-25.526	-44.538	4.8236	6.2006
	C	4.2884	-3.0554	21.0903	25.1317
	D	75.831	79.1318	86.0998	84.0392
IE4	A	-4.9735	-13.0355	8.432	-8.8538
	B	-21.453	-36.9497	2.6888	-20.3352
	C	2.6653	-4.3621	14.6236	8.9002
	D	79.055	82.0009	87.6153	85.0641

Os coeficientes de interpolação referentes a motores de 0.75kW até 200kW são apresentados na tabela 2.7.

Devido às tendências regulatórias cada vez mais restritivas introduzidas pelos MEPS, e com cada vez maior consciência dos benefícios indiretos em termos económicos e ambientais, os fabricantes trabalham em novas soluções na senda de atingir cada vez melhores

⁹Para valores superiores a eficiência mantém-se constante, facto que devém da natureza logarítmica da expressão.

¹⁰Na versão atual da norma já não é referenciada a classe IE1, considerada obsoleta e ineficiente. No entanto, para o desenvolvimento da ferramenta consideram-se, como possibilidade de pressuposto do cliente, a classe IE1 (Na ferramenta, ainda serão consideradas as classes EFF3 e EFF4 onde se aplica um acréscimo de 20% e 30% das perdas em relação a IE1, respetivamente.)

Tabela 2.7: Coeficientes de interpolação referentes aos limites mínimos de eficiência para cada classe IE e para diferentes números de pares de polos para motores $P_n \geq 0,75kW$ [31].

Classe IE	Coeficientes	8 polos	6 polos	4 polos	2 polos
IE1	A	0.0786	0.0786	0.5234	0.5234
	B	-3.5838	-3.5838	-5.0499	-5.0499
	C	17.2918	17.2918	17.418	17.418
	D	72.2383	72.2383	74.3171	74.3171
IE2	A	2.1311	0.0148	0.0278	0.2972
	B	-12.029	-2.4978	-1.9247	-3.3454
	C	26.719	13.2470	10.4395	13.0651
	D	69.735	77.5603	80.9761	79.077
IE3	A	0.7189	0.1252	0.0773	0.3569
	B	-5.1678	-2.613	-1.8951	-3.3076
	C	15.705	11.9963	9.2984	11.6108
	D	77.074	80.4769	83.7025	82.2503
IE4	A	0.6556	0.3598	0.2412	0.34
	B	-4.7229	-3.2107	-3.3608	-3.0479
	C	13.977	10.7933	8.446	10.293
	D	80.247	84.107	86.8321	84.8208

níveis de eficiência energética. A legislação, por sua vez, tende a estar a par dos avanços tecnológicos por parte dos fabricantes. Tome-se como exemplo, a exclusão da classe IE1 da norma IEC 60034-30:2014 e a inclusão da IE4. Na versão atual da norma é já mencionada a classe IE5, como estando em desenvolvimento (pretende-se que se reduza as perdas em 20% relativamente aos IE4).

Os fabricantes debateram-se com dificuldades para atingir os níveis de eficiência IE4 com motores de indução, e é praticamente impossível que o consigam fazer para a classe IE5. No entanto, estes já possuem, ainda que para gamas de potência limitadas, motores capazes de atingir níveis de eficiência IE5, porém com tecnologias alternativas ao motor de indução: motores de ímanes permanentes e motores de relutância síncrona [32].

Nos últimos anos, a união europeia tem vindo a trabalhar com vista a alargar o âmbito da regulamentação, preparando as mudanças no sentido falado no parágrafo anterior. Um novo estudo preparatório (*European Commission - Lot 30 on special motors and drives*), tem sido levado a cabo com o intuito de alargar o âmbito do regulamento a motores fora do espectro de potências atualmente consideradas, e a outras tecnologias que virão concorrer com os motores de indução atrás já referidas.

As políticas europeias *EcoDesign*, identificadas e propostas pela Comissão Europeia e com maior relevância, conhecidas como *Ecodesign Policy Options (PO)* que têm que ver com motores elétricos trifásicos, bem como a proposta de data de entrada em vigor, têm em consideração a redução de impacto ambiental, tal como o custo de ciclo de vida e a evolução tecnológica presente no mercado [33][22]. São elas:

1. **(1 de Janeiro de 2018)** - Motores trifásicos com potência nominal entre 0,12kW e 0,75kW devem possuir eficiência superior ou equivalente a IE2;
2. **(1 de Janeiro de 2018)** - Motores trifásicos de Baixa Tensão (BT) e de Média Tensão (MT) com potência nominal entre 375kW e 1000kW devem possuir eficiência superior ou equivalente a IE3;
3. **(1 de Janeiro de 2018)** - Requisitos de informação obrigatória em motores: A obrigatoriedade de apresentação da informação do motor na chapa de características torna-se obrigatória para motores com $0,12\text{kW} \leq P_n \leq 1000\text{kW}$. (maior abrangência do Regulamento (CE) n.º 640/2009). A chapa de características deve incluir a designação IE4 ou IE5, caso se verifique;
4. **(1 de Janeiro de 2018)**- Os dispositivos conversores de frequência, VEV, devem possuir classe de eficiência maior ou igual a IE1. (A norma EN 50598 define classes de eficiência para conversores de frequência: IE0, IE1, IE2);
5. **(1 de Janeiro de 2018)**- Passam a estar incluídos na diretiva motores à prova de explosão e motores-freio;
6. **(1 de Janeiro de 2022)**- Remoção da opção de instalação de motores de classe IE2 quando acionados por VEV (IE2+VEV), passando a ser obrigatório o standard IE3 para todos os motores com Potência nominal $\geq 0,75\text{kW}$;
7. **(1 de Janeiro de 2022)**- Aumento dos requisitos mínimos obrigatórios para motores de médio calibre ($0,75\text{kW} > P_n \geq 375\text{kW}$) de IE3 para IE4.
8. **(1 de Janeiro de 2022)**- Aumento dos requisitos mínimos obrigatórios para motores de grande calibre ($375\text{kW} > P_n \geq 1000\text{kW}$) de IE3 para IE4.

Para conhecimento, na tabela resumo 2.8, incluem-se as principais normas no contexto dos sistemas motrizes [34].

Tabela 2.8: Resumo de normas IEC para motores e variadores eletrônicos de velocidade [34].

Âmbito	Testes de eficiência e perdas	Classificação de Eficiência
Motor	IEC 60034-2-1	IEC 60034-30-1
Motor (quando operado por VEV)	IEC 60034-2-3	IEC TS 60034-30-2
VEV	IEC 61800-9 (publicada em março de 2017)	
MOTOR + VEV		

A norma IEC 61800-9-2, publicada no início de 2017, é relativa a “métodos para testes de medição de perdas e classificações de eficiência”. Os MEPS para VEV estão sob

a revisão do regulamento CE nº640/2009 da Comissão Europeia em vigor, como já foi referido pela Diretiva 2005/32/EC, com respeito aos requisitos ecológicos de conceção de máquinas elétricas rotativas.

A consideração de normas, propostas futuras, e diferenças relativamente às normas IEC, são passíveis de influenciar a construção dos modelos das ferramentas, tornando-a apta para ser usada após a introdução de normas europeias futuras.

2.2.2 Considerações e Caracterização do Mercado e da Indústria

Como já referido na secção anterior, a implementação de MEPS tem-se revelado um fator preponderante no crescimento das vendas e no aumento do dinamismo do mercado de motores de alta eficiência. Repare-se que este é um mercado onde os fabricantes concorrem fortemente em preço, que é um fator com influencia na decisão de compra do consumidor final, que por falta de informação, tende, por vezes, a valorizar o custo inicial de investimento em vez dos custos de operação (figura 2.8).



Figura 2.8: Análise do custo de ciclo de vida a 15 anos, para 2000h, 4000h, 6000h de funcionamento por ano (motor IE2, 11kW) [35].

Segundo [36], os motores são responsáveis por cerca de 70% do consumo de energia elétrica na indústria. Deste consumo, cerca de 40% é devido a aplicações de ventilação e bombagem. Aplicações de ar comprimido são responsáveis por 25% (figura 2.9).

Na figura 2.10, é possível observar por intervalos de potência o consumo energético, a capacidade instalada e o valor médio de tempo de operação anual no setor industrial. É de notar a forte tendência para que motores com valores de potência nominal crescente, apresentem tempos de operação mais elevados.

Na indústria, os valores de tempo de operação dos motores são altos quando comparados com outros setores, aumentando a atratividade de investimento em eficiência energética em sistemas motrizes.

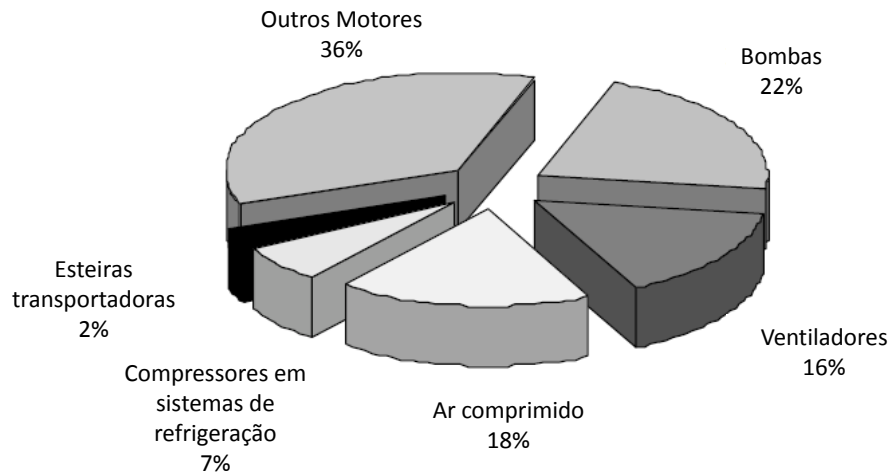


Figura 2.9: Cota de consumo na indústria por tipo de aplicação [37].

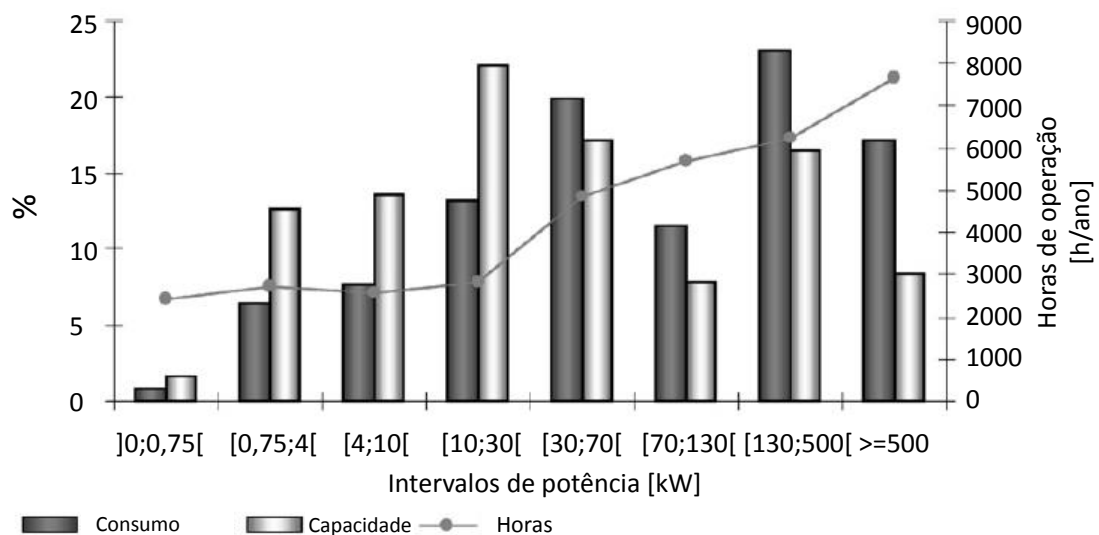


Figura 2.10: Cota de consumo, de capacidade instalada e tempo de operação por intervalos de potência [37].

Repare-se também que, aplicações de ventilação e bombagem são, de longe, as que mais beneficiam da aplicação de variação eletrónica de velocidade.

A substituição por motores mais eficientes não é vista muitas vezes, principalmente por pessoal não técnico, como uma prioridade de investimento, dando-se mais importância a fatores como o custo de investimento ou a reputação da marca.

Em [37], num estudo levado a cabo em seis países (Portugal, Dinamarca, França, Alemanha, Itália, e Reino Unido), conclui-se que os motores em geral, em todos setores de atividade na indústria, se apresentam fortemente sobre-dimensionados, com fatores de carga que em média rondam os 60%. Enquanto motores de maior potência nominal apresentam em média fatores de carga mais altos (70%), motores de pequena dimensão

apresentam fatores de carga que rondam os 50%. Esta tendência é confirmada pela figura 2.10.

Torna-se ainda interessante atentar aos dados presentes em [38], onde é possível observar a influência do fator de carga abaixo do nominal (25%, 50%, 75%), na eficiência das máquinas, em função da potência nominal. Principalmente para fatores de carga abaixo de 50%, a degradação do rendimento torna-se bastante mais evidente.

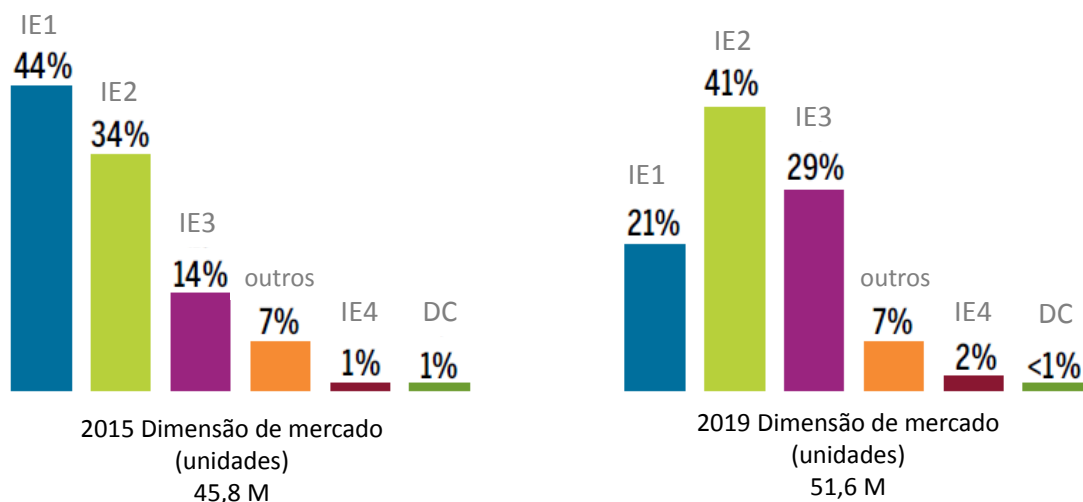


Figura 2.11: Previsão na evolução do mercado de motores [27].

Na figura 2.11, mostra-se ainda evolução nas cotas de mercado para 2019.

2.2.3 Considerações sobre *Downsizing* na Substituição de Motores

Na indústria, devido à abordagem conservadora na fase de projeto, com a aplicação de inúmeros fatores de segurança relacionados com a incerteza nas cargas acionadas, a grande maioria dos motores encontram-se sobredimensionados [39].

Segundo [40] e [41], na união europeia a população de motores apresenta-se com fatores de carga na ordem dos 60%.

O sobredimensionamento leva não só à redução da eficiência relativamente aos valores nominais, como também à degradação do $\cos \varphi$. Além disto, implica um investimento inicial superior.

Muitas vezes, no entanto, um motor de maior potência nominal, trabalhando sobredimensionado, apresenta, mesmo assim, um valor de rendimento superior. Há que atentar, ainda assim, que um motor sobredimensionado a trabalhar com maior eficiência e mais próximo da sua velocidade síncrona, pode originar aumentos nos consumos dependendo do tipo de carga que aciona.

Não obstante o custo inicial superior, segundo [39], o sobredimensionamento poderá levar a um aumento do ciclo de vida do produto (maior robustez a nível dos isolamentos

nos enrolamentos e dos rolamentos). Este é um facto importante já que a fiabilidade é um fator decisivo para a indústria [42].

Por outro lado, como já foi dito, um motor sobredimensionado, tem como consequência a diminuição do fator de potência, que pode levar à necessidade de compensação e a um aumento das perdas nos condutores por efeito de joule a montante e consequentes quedas de tensão. Isto pode levar a um aumento do tempo de retorno de investimento.

2.2.4 Rebobinagem

A rebobinagem é uma prática comum de reparação de motores, a considerar em caso de avaria. Segundo [38], motores de médio e grande calibre são tipicamente reparados entre uma e quatro vezes durante o seu ciclo de vida.

O processo de rebobinagem obedece a critérios muito rigorosos, podendo levar à diminuição da eficiência na ordem dos 1% e 4% [43]. Isto deve-se não só à alteração das propriedades físicas do núcleo do estator, onde os enrolamentos são arrancados com recurso a calor, mas também aos processos de rebobinagem.

2.3 Variação de Velocidade em Sistemas Motrizes

O uso de variadores de velocidade em processos eletromecânicos industriais sempre foi uma necessidade, tendo vindo a generalizar-se, em particular nas sociedades industrialmente mais desenvolvidas. Neste contexto, o controlo de posição, velocidade e binário dos motores é de enorme importância. Ao controlo de grandezas como a velocidade e o binário, poderá estar associado um aumento de produtividade, um aumento da qualidade do produto final ou da eficácia do sistema eletromecânico. Além disso, o uso destes dispositivos está também, em alguns casos, ligado à redução de custos energéticos.

Enquanto em algumas aplicações, por exemplo, características da indústria do papel [44], ou dos cereais, são totalmente dependentes do controlo de velocidade dos sistemas motrizes na sua laboração e para o controlo de processos, outras, como a bombagem ou ventilação, o controlo de velocidade pode introduzir reduções no consumo energético e um aumento da eficiência global do sistema.

Neste capítulo, far-se-á um estudo não incidente apenas nos métodos para a variação de velocidade em motores, mas também de técnicas, ou tecnologias mais comuns usadas no controlo de velocidade de processos eletromecânicos na indústria.

2.3.1 Variação de Velocidade em Motores de Indução

Como se viu em 2.1.3, a velocidade mecânica da máquina é dada por,

$$n_r = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (2.11)$$

Desta expressão é possível inferir que a velocidade de rotação do motor pode ser variada atuando em três grandezas:

1. No número de pares de polos;
2. No escorregamento;
3. Na frequência de alimentação.

Existem naturalmente métodos ou técnicas desenvolvidas que atuam diretamente sobre estas grandezas.

Métodos Baseados na variação do número de pares de polos

Este método tem por base uma mudança do número de pares de pólos, fazendo variar de forma discreta a velocidade de sincronismo do motor.

Neste tipo de motores existe um enrolamento especial, que dependendo do modo de ligação, permite comutar entre dois valores, o número de pares de polos. A valores diferentes do número de pares de polos corresponderam velocidades síncronas diferentes.

Os motores *Dahlander* são máquinas cuja característica permite a comutação entre duas velocidades síncronas. Na versão em que o motor possui dois enrolamentos separados, podem funcionar comutando o número de pares de pólos entre 2 e 4 polos, 4 e 8 polos, 6 e 12 polos, ou seja, sempre com razão de velocidades de 2:1. Noutras configurações podem ser ligados em estrela, triângulo, ou dupla estrela. Estes motores estão atualmente disponíveis comercialmente.

Também existem outros motores com enrolamentos independentes, que sendo ou não “iluminados” pelas tensões sinusoidais da rede, permitem a comutação do número de polos e várias combinações de velocidades. As velocidades dependerão do número de polos em cada enrolamento.

A aplicação deste tipo de motor torna-se interessante, em situações cuja característica do perfil de carga, seja aproximadamente constante, variando entre duas velocidades distintas. Esta técnica permite um bom espectro em termos dos valores absolutos de variação de velocidade, mas com comutações discretas, tornando-se pouco versátil neste aspeto.

Métodos baseados na variação do escorregamento

Estes métodos baseiam-se na variação do escorregamento do rotor. Neste caso, a velocidade de sincronismo é mantida, mas alterar-se-á a curva binário-velocidade do motor. Para o mesmo binário de carga, obteremos diferentes escorregamentos e, portanto, diferentes velocidades mecânicas.

A alteração das curvas binário-velocidade do motor, ou no contexto, a velocidade do motor, pode ser manipulada de duas formas: através da variação da resistência rotórica, ou da variação da tensão de alimentação.

A **variação da resistência rotórica**, só é possível em motores de rotor bobinado, como já foi falado no capítulo 2.1.1. A alteração da resistência rotórica corresponde a uma translação do ponto de binário máximo, relativa ao eixo das velocidades ou dos escorregamentos. Aumentando o valor das resistências rotóricas, o ponto de binário máximo desloca-se para a esquerda, influenciando indiretamente na velocidade do motor.

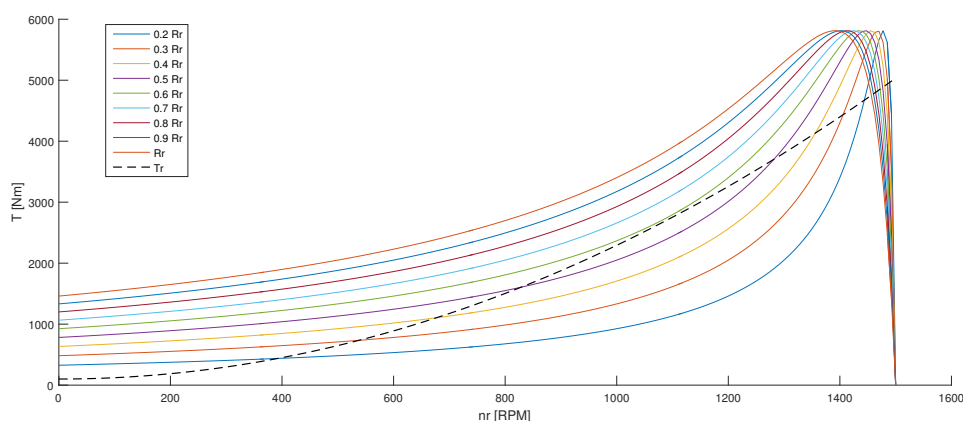


Figura 2.12: Curvas de binário em função da velocidade, com variação da resistência rotórica (simulação efetuada em Matlab pelo autor).

Esta abordagem mostra-se bastante limitada, sendo que o espectro de velocidades possíveis é pouco amplo (figura 2.12 e 2.13). Para uma velocidade reduzida, virá um grande escorregamento, o que torna possível associar a elevadas perdas, pois sabe-se que de forma mais ou menos grosseira,

$$\eta \propto 1 - s \quad (2.12)$$

Embora esta a variação da resistência rotórica seja um método comum nos motores de rotor bobinado, esta tem especial interesse no arranque, e não na variação de velocidade, ou em termos de eficiência energética.

A **variação da tensão alimentação** tem como base a manipulação da tensão estatórica do motor, de forma progressiva ou por passos, através de dispositivos para o efeito, o Auto-transformador - já abordado no capítulo 2.1.5 - ou variadores de tensão eletrónicos,

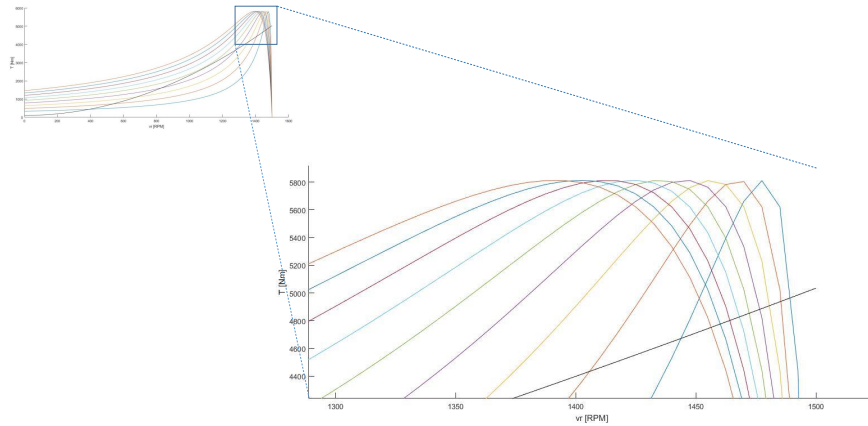


Figura 2.13: Vista em *zoom* dos pontos de funcionamento do motor com a variação da resistência rotórica (simulação efetuada em Matlab pelo autor).

que usam tipicamente *Silicon Controlled Rectifiers* (SCR's).

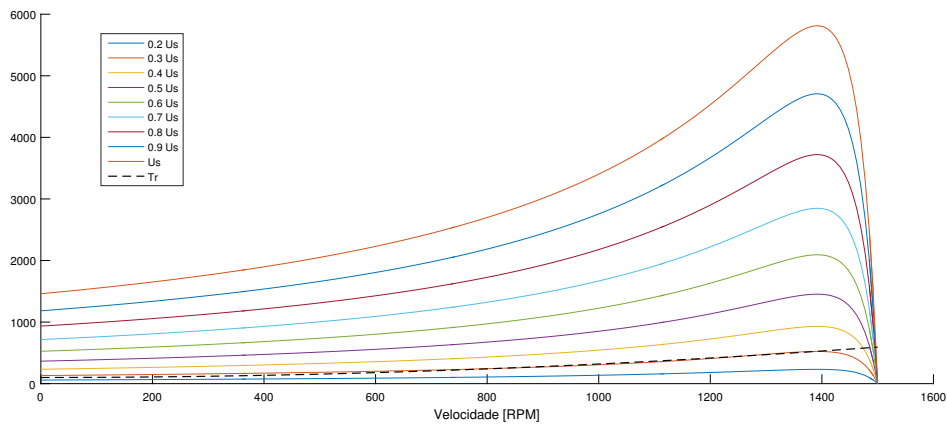


Figura 2.14: Curvas de binário em função da velocidade com diferentes tensões de alimentação (simulação efetuada em Matlab pelo autor).

Esta técnica, no contexto da variação de velocidade de rotação em motores, peca pela pouca versatilidade em termos do espectro de velocidades disponíveis (figura 2.14 e 2.15). Além disso, uma diminuição da tensão, corresponde, na curva binário-velocidade, a uma deslocação do ponto de binário máximo, no sentido descendente do eixo dos binários, de forma quadraticamente proporcional.

$$T \propto U^2 \quad (2.13)$$

Isto faz com que o motor trabalhe mais próximo do seu binário máximo, e dependendo da carga acionada, poderá não ser uma opção robusta.

Tal como nos métodos de variação de velocidade baseados no escorregamento, o rendimento também virá prejudicado.

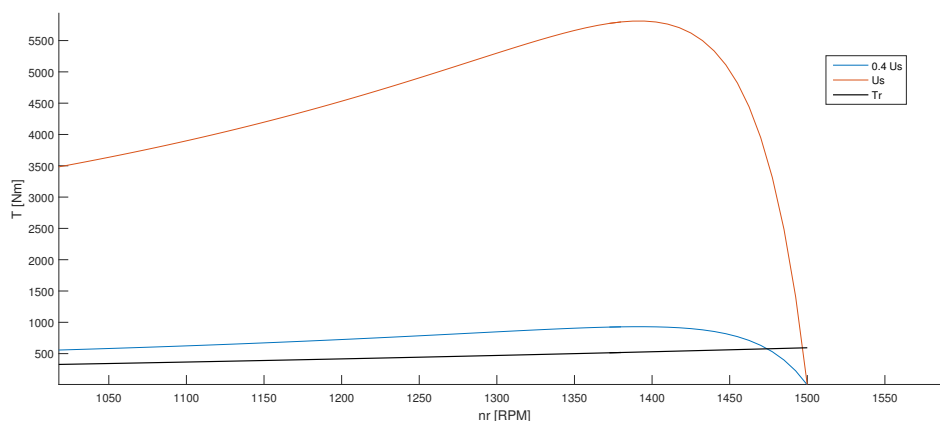


Figura 2.15: Curvas de binário em função da velocidade com diferentes tensões de alimentação (zoom à imagem 2.14, e com simulação à tensão nominal U_s e a $0,4 \cdot U_s$) (simulação efetuada em Matlab pelo autor).

Este tipo de dispositivos já não é comum na indústria.

Regulação da velocidade por variação da frequência de alimentação

Este método tem fundamento na característica diretamente proporcional entre a frequência da tensão de alimentação e a velocidade do campo girante. Manipulando a frequência da onda de tensão estatórica, a velocidade de rotação do motor virá alterada na mesma proporção (figura 2.16).

Através da eletrónica de potência, mais concretamente com dispositivos conhecidos como variadores eletrónicos de velocidade, inversores ou variadores de frequência, é possível sintetizar a frequência de alimentação em espetros, entre 0 e 150 Hz.

A regulação de velocidade através da variação de frequência apresenta-se assim como uma técnica de enorme flexibilidade e com tecnologia mais eficaz, sem prejuízo considerável no rendimento do motor. Ao contrário dos métodos anteriormente falados, este também apresenta grande precisão no controlo da velocidade (e do escorregamento).

2.3.2 Controlo de Velocidade através de Métodos Mecânicos

A variação da velocidade num sistema eletromecânico pode ser conseguida através de dispositivos de controlo de velocidade mecânicos. Podem ser usados sistemas ajustáveis com polias, correias, ou engrenagens mecânicas [45].

Tipicamente, os métodos mecânicos permitem transformar a velocidade constante do motor noutra velocidade constante, maior ou menor, não sendo, no entanto, em muitos

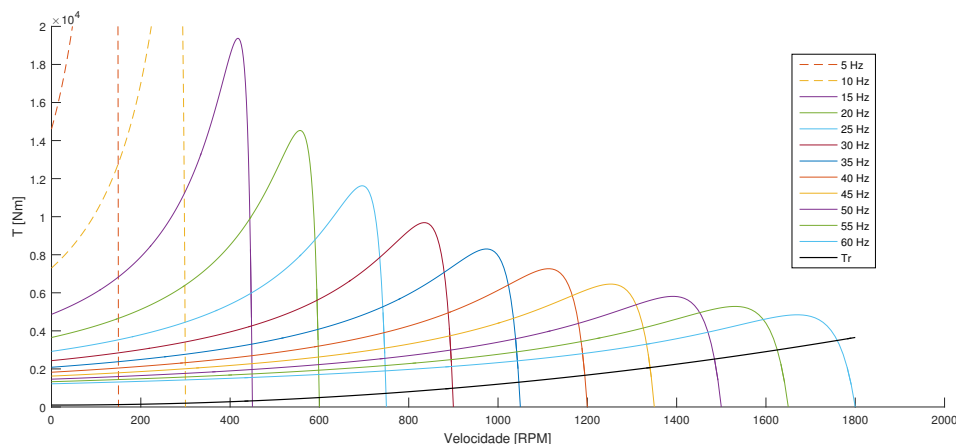


Figura 2.16: Curvas de binário em função da velocidade com diferentes frequências de alimentação com tensão de alimentação constante. (Estas curvas obtidas através do circuito de *Steinmetz* simplificado, não considera a saturação da máquina).

casos, possível ajustar a velocidade em situações de cargas variáveis.

Há que ter em conta que estes elementos introduzem perdas adicionais no sistema eletromecânico. A eficiência destes sistemas e dispositivos de transmissão mecânica depende de um conjunto de fatores como a tensão (mecânica), o tipo, ou o número de elementos. A eficiência sai fortemente prejudicada para velocidades fora da estipulada, sejam estas muito altas ou demasiado baixas [45].

Cerca de um terço das aplicações de motores elétricos, na indústria, usam acoplamentos por correias. Estas conferem versatilidade no posicionamento do motor em relação à carga, facilitando a transmissão em locais de difícil acesso.

Algumas polias de diferentes tamanhos permitem variar a velocidade, ainda que de forma escalonar. Polias fixas (figura 2.17-a) permitem a variação discreta e muito pouco versátil de velocidade, isto é, uma vez definida uma velocidade de rotação, e havendo necessidade desta ser alterada, a máquina deve ser desligada para que seja possível alterar as relações entre as polias.

O método de variação por polias cónicas (figura 2.17-b) permite a variação contínua de velocidade. É possível variar a velocidade do acionamento, alterando o posicionamento da correia sobre a superfície cónica. Ainda assim, este método não permite a variação de velocidade em gamas muito amplas, nem uma resposta dinâmica rápida ou muito precisa.

O método representado em 2.17-c) apresenta uma polia, formada através de duas flanges cónicas que se deslocam sobre o eixo do acionamento. Com o aumento da distância entre as flanges, a correia variará a sua posição no sentido descendente, alterando assim o diâmetro relativo da polia e, desta forma, a velocidade do acionamento. Uma desvantagem deste sistema é a necessidade de manutenção periódica devido ao desgaste da correia.

As engrenagens são tipicamente utilizadas em aplicações que requerem baixas velocidades – inferiores a 1200 rpm – e binários elevados (em que a utilização de correias resultaria em escorregamento). Existem engrenagens helicoidais, de dentes direitos, ou

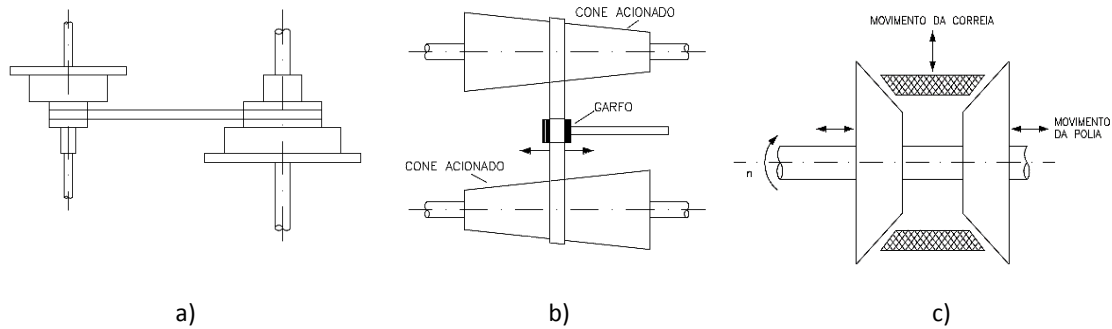


Figura 2.17: Sistemas de variação de velocidade por: a) polias fixas escalonares, b) polias cónicas, c) polias variadora de flanges cónicas [46].

sem fim. As caixas de redutoras são de largo uso em acionamentos mecânicos. Estes mecanismos são úteis em aplicações em que a gama de velocidades indicada seja substancialmente menor do que a velocidade nominal do motor, e ao mesmo tempo o binário necessário seja superior ao binário nominal do motor. Outro motivo para a utilização de redutores, é o ganho de resolução em posicionamento (as bobinadoras axiais de rolos de aço, são um bom exemplo de aplicação destes dispositivos na indústria metalúrgica, onde são necessários grandes binários a baixa velocidade e um bom controlo de posição para que se mantenha a tensão mecânica aplicada à tira de aço) [2]. Estes são, normalmente, dispositivos de relativamente baixa eficiência e limitados a baixas potências (engrenagens para grandes potências representam investimentos na ordem das dezenas de milhares de euros).

Existem ainda correias em V, correias com dentes, correias síncronas e correias lisas, diferenciando-se, por exemplo, pela sua eficiência. A eficiência de uma transmissão por correias tem tendência a aumentar com a potência mecânica da carga acionada. Referem-se abaixo, eficiências típicas de alguns tipos de correias.

- *Correias em V*- 80% ~ 88%;
- *Correias planas*- 92% ~ 94%;
- *Correias dentadas*- 96% ~ 98%;
- *Correias síncronas* - ~ 98%;
- *Correntes*- ~ 98%.

Com o aumento da complexidade e exigência, em vários processos, da necessidade de precisão de ajuste da velocidade ou de uma larga faixa de variação, novos métodos foram surgindo.

Os vários tipos de redutores têm como característica comum, o que se define por *relação de transmissão*, i , como a razão entre a velocidade de entrada, ω_1 , e de saída, ω_2 .

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.14)$$

A relação de binários vem inversa à relação de transmissão,

$$i = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.15)$$

O sistema traz também benefício, baixando o momento de inércia visto do lado do motor, pelo quadrado da razão de transmissão.

Este tipo de transmissão pode ser efetuado de forma análoga por:

1. Redutor com dentes enviesados;
2. Redutor de sem-fim e roda de coroa;
3. Corrente;
4. Tambor e correia;
5. Correia Dentada.

Existem, no entanto, transmissões mecânicas de velocidade variável. Estas estão presentes na indústria com expressividade em determinadas aplicações, muito pela sua simplicidade e pelo baixo custo. Um exemplo disso, são as transmissões por corrente ou correia com polias de diâmetro ajustável. A velocidade é variada, ajustando o diâmetro das polias e assim variando a relação de transmissão.

Variando em simultâneo o diâmetro, tanto da polia motriz, como da polia acionada, é possível variar a razão de transmissão e ainda assim manter o comprimento da correia. Para baixas potências é possível obter razões de transmissão de 16:1. Podem ainda ser usadas em simultâneo com caixas redutoras, para que se obtenha um espectro de velocidades de saída ainda maior [44].

2.3.3 Controle de Velocidade através de Acoplamento Eletromagnético ou *Eddy Current Clutch*

Conhecido também como *Eddy Current Coupling*, é um método simples e eficaz de realizar variação de velocidade em acionamentos, usado em aplicações industriais há mais de 50 anos. Este sistema é normalmente montado diretamente na flange do motor.

Tirando partido dos princípios da indução eletromagnética, o binário é transferido de um tambor rotativo, montado no veio do motor, através de uma entre-abertura de ar, até ao tambor e veio de saída.

A velocidade de saída depende do escorregamento entre ambos os tambores, que por sua vez é controlado pela força do campo magnético, através de enrolamentos, alimentados por uma fonte de tensão DC exterior, normalmente através de um conversor tiristorizado.

Quando um material condutor se move através de linhas de fluxo de campo magnético, são induzidas correntes de Foucault, que circulam em trajetórias circulares. A intensidade das correntes de Foucault é determinada pela força de campo magnético e da velocidade relativa entre o veio de entrada e de saída.

As correntes de Foucault acabam por estabelecer o seu próprio campo magnético que interage com o fluxo magnético primário, que se opõe ao movimento relativo entre os dois campos, realizando o acoplamento entre o tambor de saída e de entrada. O binário é assim transferido de um acionamento motriz de velocidade fixa, até ao veio de saída com algum escorregamento entre os tambores.

O binário de saída, e este escorregamento, estão dependentes da força do campo magnético, que por sua vez é controlado através da fonte DC externa. Se não for aplicada tensão, não haverá linhas de fluxo, e portanto não há acoplamento e o escorregamento é máximo.

Esta aplicação origina um *derating* do binário a baixas velocidades por aquecimento excessivo. Outra limitação é a necessidade de excitação exterior, que poderá requerer anéis com escovas, que como é de conhecimento, necessitam de manutenção regular.

2.4 Tipos de Carga e Aplicações

Um motor elétrico tem como função entregar, através da realização de trabalho, energia mecânica a uma carga. Repare-se que a natureza da carga, toma um papel preponderante na especificação de um motor ou do inversor que a aciona.

Em sistemas de velocidade fixa, é normalmente suficiente especificar apenas a potência nominal, à velocidade nominal. Em cargas de grande potência, há que ter em atenção determinados fatores, nomeadamente, o momento de inércia, garantindo que o motor tem capacidade de satisfazer as necessidades da aplicação e termos de tempo de aceleração. Tal já não acontece quando estamos perante um sistema motriz de velocidade variável.

No caso dos acionamentos de velocidade variável, mais concretamente controlados ou alimentados por VEV, torna-se de extrema importância conhecer a natureza do comportamento da carga, que muitas vezes não é linear. Segundo [44], o binário de que um VEV é capaz de fornecer é considerado adequado quando:

1. É maior que o binário máximo imposto pela carga;
2. Consegue variar a velocidade, isto é, acelerar a carga para uma dada velocidade dentro dos requisitos temporais da aplicação;

3. Exceda o binário de carga por uma boa margem de segurança durante a operação contínua, qualquer que seja a velocidade na gama pretendida, sob quaisquer condições;
4. A corrente pedida pelo motor não exceda os limites térmicos de qualquer componente eletromecânico do VEV, e a curva de carga se mantenha abaixo da do VEV durante a operação em regime estacionário.

Existe uma vasta gama de cargas vulgarmente acionadas através de VEV's. Cada carga apresenta no entanto diferentes características binário-velocidade ou de inércia.

Para aplicações de velocidade variável, a informação mínima indispensável acerca da carga pode ser obtida através de:

1. O tipo de binário de carga;
2. O espectro de velocidades pretendido;
3. A inércia do motor e da carga a acionar [44].

Na maioria dos casos, a um sistema motor-carga, aplica-se a seguinte equação, baseada na lei fundamental dinâmica para um sistema rotativo [47][48]:

$$T_m = J\dot{\omega} + T_r \quad (2.16)$$

Onde,

T_m - Binário motor (Nm);

J - Momento de inércia do sistema motor-carga ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);

$\dot{\omega}$ - Aceleração angular ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$);

T_r - Binário resistente (Nm).

Ao termo $J\dot{\omega}$ dá-se o nome de **binário dinâmico**, uma vez que está presente apenas durante operações transitórias [48]. O seu valor é positivo ou negativo, quando a carga acelera ou desacelera respetivamente. Isto quer dizer que para cargas de grande inércia, e com necessidades de tempo de atuação curtas, o binário motor poderá vir negativo na desaceleração. Pense-se por exemplo, numa carga de grande inércia, controlada por VEV. Se o controlo vier num dado momento, fazer com que se injete uma frequência de alimentação mais baixa, por instantes, a velocidade síncrona, virá muito menor que a velocidade do rotor, estando a máquina a trabalhar como gerador ou como travão à carga.

De maneira oposta, em aplicações de prensagem, por exemplo, é necessário a aplicação de um grande binário num muito curto intervalo de tempo. Nestes casos, o sistema pode até beneficiar da aplicação de uma *flywheel* ao veio, aumentando a inércia do sistema e permitindo que se trabalhe com uma máquina de menor potência [48].

O **binário resistente**, T_r , por sua vez, é característico do tipo de carga [47]. Esta é uma implicação recíproca, ou seja, a carga acionada pode ser caracterizada pelo seu binário resistente, que geralmente é função da velocidade, da aceleração ou da posição.

É pertinente que se refira que o binário, por sua vez, pode ser obtido através do quociente da potência mecânica pela velocidade mecânica, como é descrito na equação 2.17.

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega} \quad (2.17)$$

Apresentam-se de seguida alguns tipos de cargas onde se considera o comportamento das cargas apenas em regime permanente.

2.4.1 Cargas de Binário Quadrático

Estas são cargas cujo binário resistente varia com o quadrado da velocidade. Este tipo de variação do binário com a velocidade, está intimamente ligado ao atrito devido escoamento turbulento de fluidos [47].

Como se exclui o funcionamento em regime dinâmico (equação 2.16), com $J\dot{\omega} = 0$, a equação que modela estes tipos de binário de carga vem:

$$T_r = K_A \Omega^2 \quad (2.18)$$

Considerando que a potência mecânica se traduz pelo produto da velocidade angular e do binário, é possível concluir que para cargas ditas de binário quadrático a potência virá proporcional ao cubo da velocidade,

$$P_{mec} = T_r \Omega = K_A \Omega^3 \quad (2.19)$$

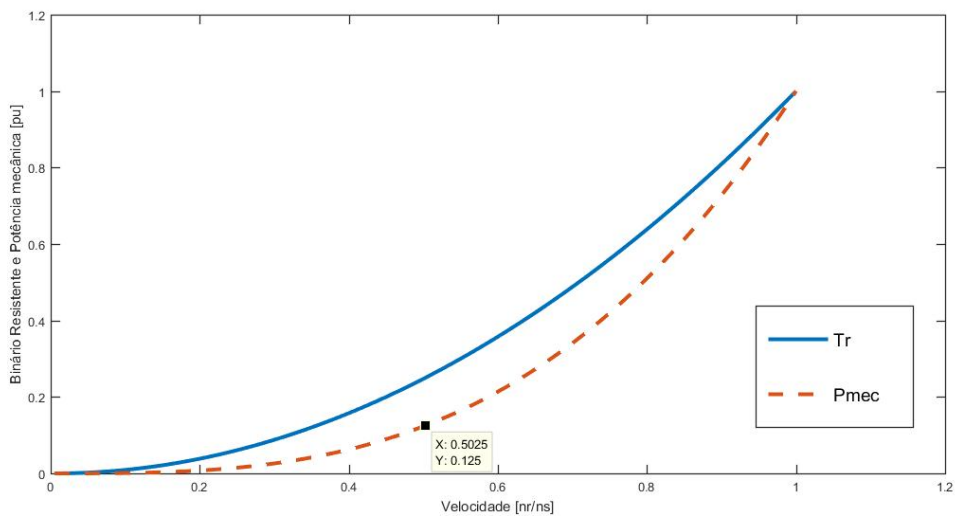


Figura 2.18: Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de binário quadrático.

Repare-se que o potencial de economia da energia fornecida a este tipo de cargas, reduzindo a velocidade de rotação, é bastante interessante.

As aplicações normalmente associadas a este tipo de cargas são:

1. Bombas centrífugas;
2. Ventiladores centrífugos;
3. Exaustores centrífugos;
4. Sopradores centrífugos;
5. Compressores centrífugos;
6. Centrífugas industriais [44].

As curvas ilustradas na imagem 2.18 são genéricas e representam um amplo número de aplicações. Deixam-se alguns exemplos de curvas reais de binário em função da velocidade representados na figura 2.19.

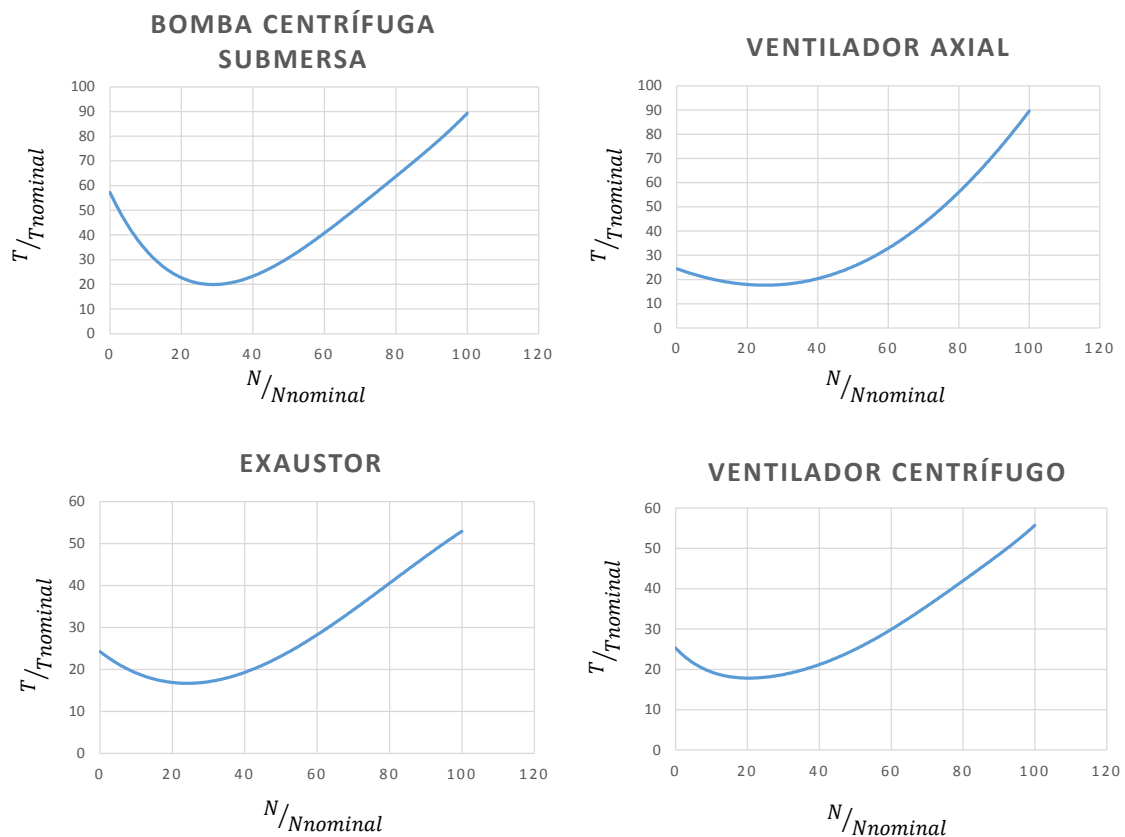


Figura 2.19: Andamento do binário em função da velocidade de rotação, em cargas reais de tipo binário quadrático.

Tirando partido de experiência acumulada em PPEC's anteriores, promovidos pela EDPC, este tipo de intervenções em média, conduz a poupanças na ordem dos 30%.

2.4.2 Cargas de Binário Linear

Em cargas desta natureza, o binário resistente varia linearmente com a velocidade. Este tipo de comportamento deve-se à ação de atrito do tipo viscoso, presente devido à existência de fluido lubrificante em escoamento laminar [47].

A equação que descreve o comportamento do binário para este tipo de cargas é:

$$T_r = K_B \Omega \quad (2.20)$$

Atentando à equação 2.17, para a potência exigida pela carga vem proporcional ao quadrado da velocidade de rotação angular,

$$P_{mec} = K_B \Omega^2 \quad (2.21)$$

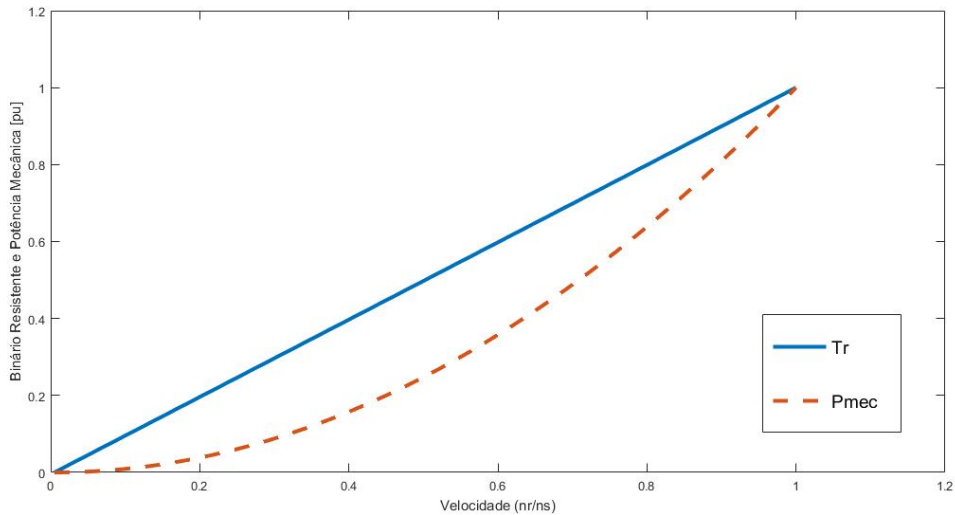


Figura 2.20: Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de binário linear.

Cargas com este comportamento estão normalmente associadas às seguintes aplicações:

1. Misturadoras;
2. Bombas de deslocamento positivo.

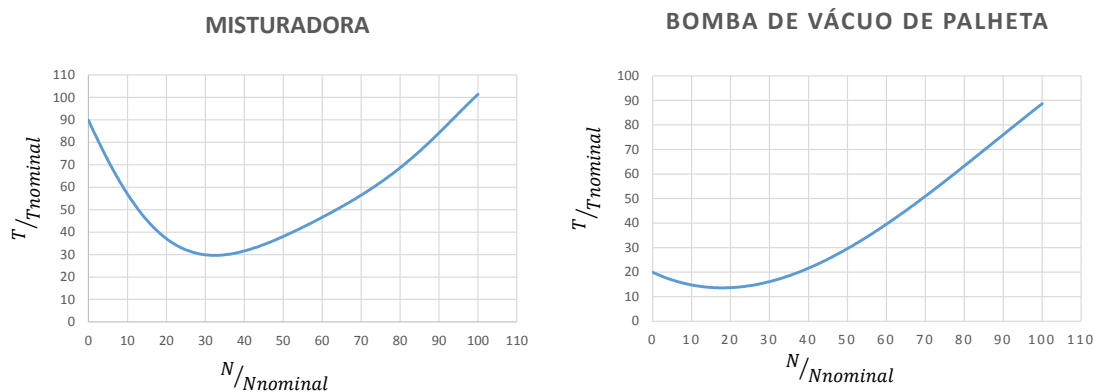


Figura 2.21: Andamento do binário em função da velocidade de rotação, em cargas reais de tipo binário linear.

As curvas mostradas na figura 2.20 são genéricas e representam um amplo número de aplicações. Deixam-se alguns exemplos de curvas reais de binário em função da velocidade na figura 2.21.

Pela experiência adquirida, este tipo de intervenções, em média, conduz a poupanças na ordem dos 20%.

2.4.3 Cargas de Binário Constante

Este tipo de cargas tem como característica, uma curva de binário constante independente da velocidade de rotação, como é observável na imagem 2.22. O binário resistente exigido por cargas desta natureza está normalmente associado ao atrito estático e atrito de *Coulomb*. Este tipo de comportamento deve-se portanto à fricção seca (a baixas rotações)[47].

Pode ser representado pela equação:

$$T_r = K_C \Omega \quad (2.22)$$

A potência varia linearmente com a velocidade angular de rotação:

$$P_{mec} = K_C \Omega \quad (2.23)$$

Em algumas aplicações, cuja presença da fricção seca mais se faz sentir, observa-se um binário mais elevado que $K_C \cdot \Omega$ na transição do repouso para a velocidade, ou seja, para velocidades próximas de zero (este efeito não é demonstrado na figura 2.22). Noutros casos esta característica é desprezável [47].

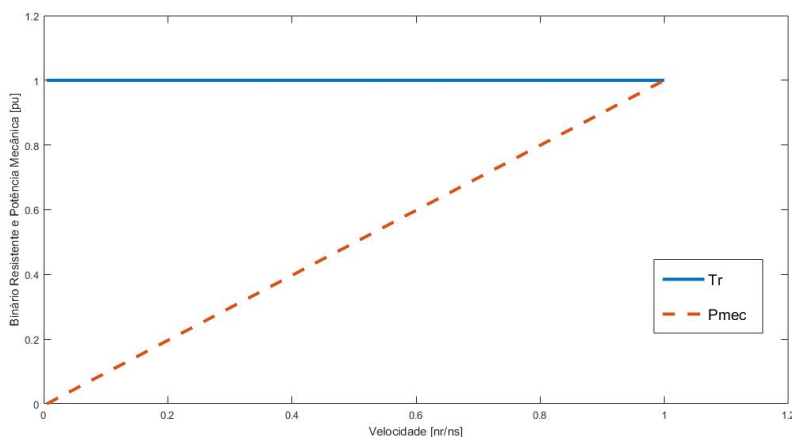


Figura 2.22: Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de binário constante.

Cargas desta natureza estão normalmente associadas às seguintes aplicações:

1. Tapetes/Esteiras transportadoras;
2. Compressor a pistão;
3. Compressor rotativo;
4. Elevadores;
5. Talhas;
6. Guindastes;
7. Prensas Mecânicas;
8. Prensas Rotativas;
9. Bombas a pistão;
10. Britadores;
11. Extrusoras;
12. Agitadores;
13. Moinhos (Ex: de bolas);

As curvas mostradas na imagem 2.22, são genéricas e representam um amplo número de aplicações. Deixam-se alguns exemplos de curvas reais de binário em função da velocidade para cargas de binário constante na figura 2.23.

Este tipo de intervenções em média, conduz a poupanças na ordem dos 15%.

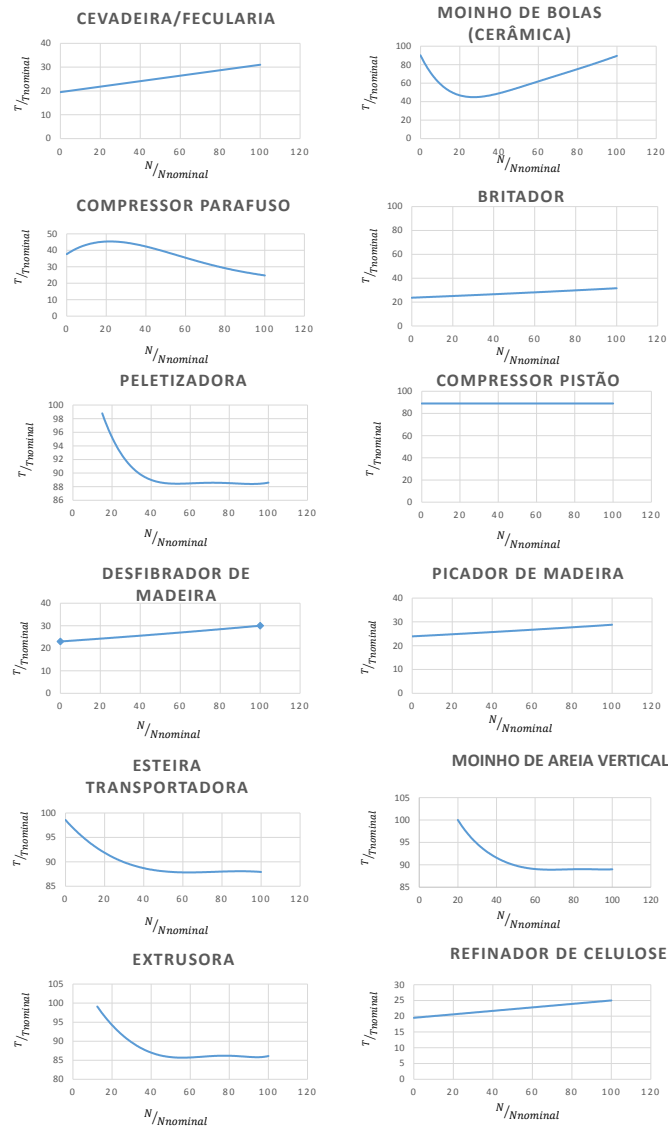


Figura 2.23: Andamento do binário em função da velocidade de rotação, em cargas reais de tipo binário constante.

2.4.4 Cargas de Potência Constante

A potência mecânica, exigida por cargas desta natureza, é independente da velocidade de rotação. O binário, por sua vez, varia de forma dependente e inversamente proporcional à velocidade, como se demonstra na figura 2.24.

Tendo em conta, desta vez em primeiro lugar, a potência, a equação que permite modelar cargas deste tipo é dada por,

$$P_{mec} = K_D \quad (2.24)$$

Apenas o binário depende da velocidade, podendo ser descrito da seguinte forma,

$$T_r = \frac{K_D P_{mec}}{\Omega} \quad (2.25)$$

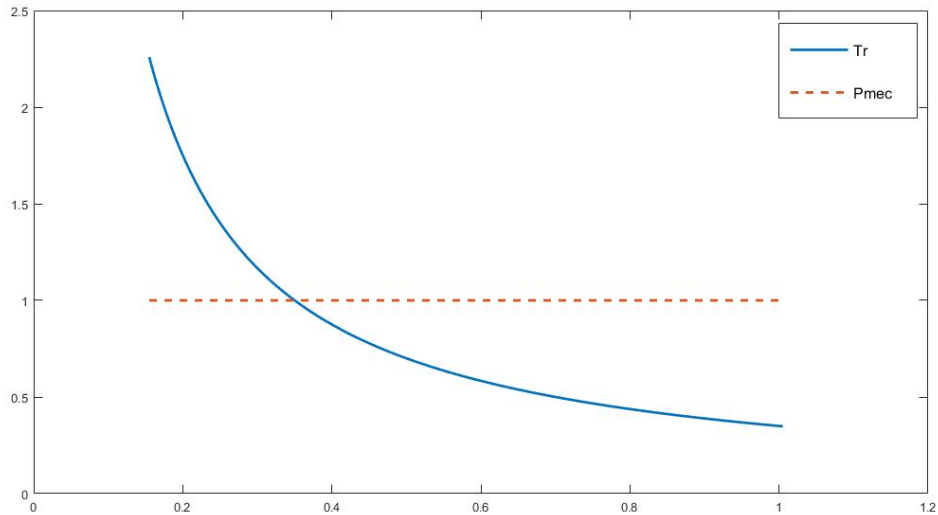


Figura 2.24: Andamento do binário e da potência com a variação de velocidade para cargas de potência constante.

São exemplo deste tipo de carga, as seguintes aplicações:

1. Bobinadoras (Ex: papel, pano, fio);
2. Descascadora de toros;
3. Tornos;
4. Máquinas ferramenta (Ex: corte ou perfuração) [44];
5. Amassadoras.

A implementação de variação eletrônica de velocidade, em aplicações afetas a este tipo de cargas, conduz, em média, a poupanças na ordem dos 5% e a sua viabilidade está dependente de determinados fatores, por exemplo, relativos ao processo de produção.

2.4.5 Aplicações

Ventiladores

A principal função de um ventilador é movimentar grandes volumes de ar ou gases, cujas pressões sejam suficientes para superar a resistência dos sistemas que acionam [49].

Para que se perceba de que maneira é possível tornar estes sistemas mais eficientes, há que primeiro, possuir a compreensão do funcionamento deste tipo de sistemas.

Os ventiladores centrífugos são, geralmente, dispositivos de baixa pressão (em comparação com os compressores, por exemplo), utilizados em sistemas de ventilação. Existem ainda ventiladores centrífugos de alta pressão, conhecidos na indústria como sopradores ou *blowers*. Estes sistemas produzem valores de pressão entre os (0,5 kPa e os 10 kPa).

Na figura 2.25 é possível observar as características de um ventilador para determinada velocidade de rotação, isto é, para determinado caudal:

1. $H(Q)$ - Altura manométrica em função do caudal;
2. $P(Q)$ - Pressão em função do caudal;
3. $\eta(Q)$ - Rendimento em função do caudal.

Será de interesse, conhecer o caudal Q , que é debitado pela máquina quando esta se encontra acionando um certo sistema. Daqui em diante, por sistema entenda-se, todo o caminho que o fluido toma desde que é sugado até ser descarregado.

Ao longo deste caminho, o fluido poderá passar por condutas, curvas, câmaras e/ou válvulas. As perdas neste caminho, estarão diretamente relacionadas com a presença, número, e dimensões destes elementos constituintes do sistema. É assim possível efetuar um cálculo, tendo em posse a informação destes elementos, determinando as perdas do sistema em função do caudal Q .

As perdas, virão, como é corroborado pela equação 2.18 , na secção 2.4, proporcionais a Q^2 . A medida que permite caracterizar nestes termos uma instalação, pode ser especificada a partir da altura manométrica H .

A altura de um sistema de ventilação varia com o caudal, e pode ser descrita por:

$$H_{sist} = K_p \cdot Q^2 \quad (2.26)$$

Na figura 2.25 é possível observar, a tracejado, a curva característica típica da instalação.

À interceção entre a curva característica da instalação e a curva característica do ventilador corresponderá um determinado caudal.

O que resulta do cruzamento das duas curvas, corresponde a um ponto de equilíbrio, onde a altura do sistema (ou perdas no caso concreto), se iguala à altura de energia entregue pelo ventilador. Este é o ponto de trabalho para dadas condições de altura, pressão, rendimento do ventilador, que são função do caudal [50].

Entre os constituintes de um sistema de ventilação já referidos, é muito comum encontrarem-se elementos cujo papel, é efetuar regulação de caudal: válvulas, pás de entrada, persianas de saída, entre outros. Repare-se que, se existir no sistema algum elemento de estrangulamento mecânico, a curva na figura 2.25 corresponderá a uma dada posição da válvula, ou a um dado ângulo de abertura das persianas de saída.

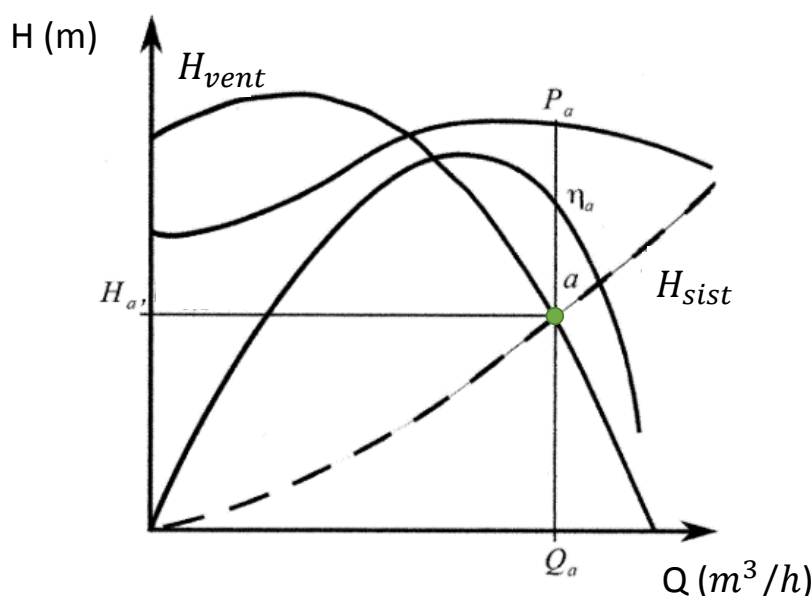


Figura 2.25: Gráfico com curvas características de um ventilador. a , ponto de funcionamento. P_a , pressão no ponto de funcionamento. η_a , rendimento no ponto de funcionamento. Q_a , caudal no ponto de funcionamento. H , altura do ventilador. $H_{sistema}$, curva característica de carga do sistema (adaptado de [50]).

As válvulas de regulação, de grande uso na indústria, constituem a forma mais simples de variar o caudal numa conduta. Considere-se agora o caso em que se pretende variar o caudal entregue pelo ventilador, variando a posição de uma válvula de regulação.

Atendendo à figura 2.26, admita-se agora que a curva de instalação H_{sist} corresponde à situação em que a válvula se encontra totalmente aberta, quer isto dizer, não será possível obter uma curva abaixo desta. Considere-se também que, para uma dada velocidade fixa do ventilador, o ponto de funcionamento corresponderá ao ponto de caudal máximo nestas condições.

A variação de caudal é conseguida, através da variação da posição da válvula, mesmo que a velocidade de rotação do ventilador se mantenha aproximadamente constante. Para uma posição diferente da válvula obter-se-á uma nova curva característica para o sistema de ventilação, H_{sistb} .

A instalação encontra agora o equilíbrio num novo ponto de funcionamento, trabalhando com um novo caudal Q_b , com uma altura maior, H_b , e com pressão ligeiramente superior.

À medida que se fecha ainda mais a válvula, resultará um caudal ainda menor, e o sistema funcionará com alturas cada vez maiores.

Repare-se que, com este tipo de abordagem, em que se recorre a uma técnica mecânica para redução de caudal, este efeito é conseguido à custa da introdução de perdas no sistema.

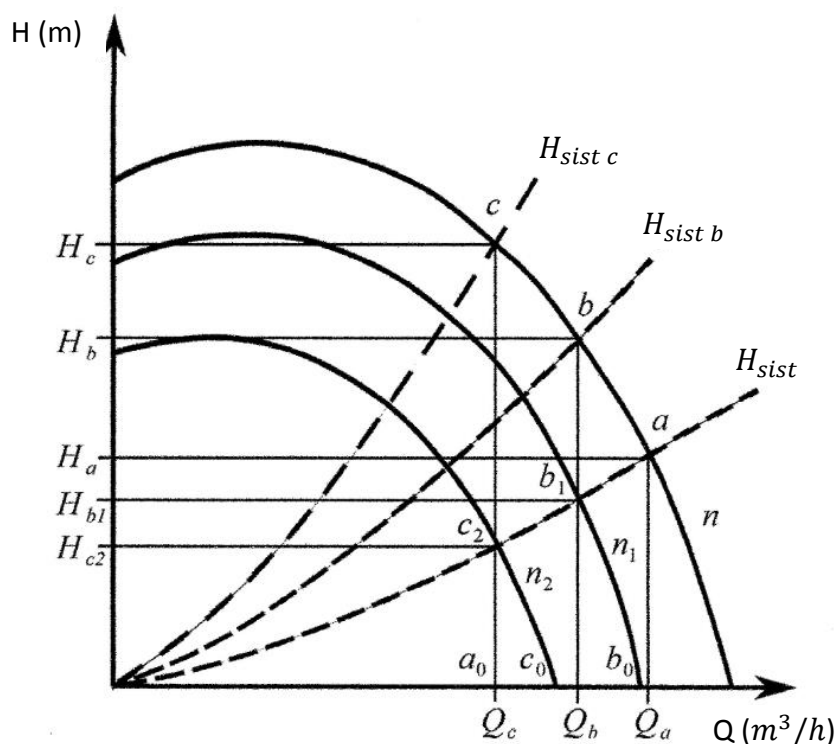


Figura 2.26: Gráfico com curvas características de um ventilador com variação da velocidade de rotação e curvas características do sistema de ventilação, com a variação do estrangulamento. ($n > n_1 > n_2$) [50].

Uma forma mais eficiente de efetuar regulação de caudal em sistemas de ventilação, será pela variação da velocidade de rotação do ventilador. Atentando à figura 2.26, observa-se que o ponto de funcionamento b_1 , pode ser obtido através da redução da velocidade para n_1 .

Como consequência, a altura de energia que o ventilador tem que vencer, decresce. Tirando partido do método de regulação por válvula, este valor é substancialmente maior para o mesmo caudal pretendido, Q_2 .

A diferença entre as alturas $\Delta H = H_a - H_b$, oferece uma medida que traduz as perdas adicionais introduzidas pelo uso da válvula. Assim se justificam os ganhos energéticos pela substituição destes dispositivos de estrangulamento.

Adicionalmente, a redução de velocidade em detrimento às técnicas de estrangulamento, oferece uma maior preservação do rendimento do ventilador, pois o ponto de funcionamento apenas se desloca na curva característica do sistema, não havendo alteração da mesma.

Quando se recorre à variação de velocidade de rotação do ventilador para efeitos de redução de caudal, não há necessidade de que se apliquem novos elementos no sistema, isto é, da introdução de perdas adicionais. Adicionalmente, os elementos já presentes na instalação, reduzem a sua “resistência” mecânica, fruto da redução de caudal.

Nos sistemas de ventilação é também comum encontrar outros meios de regulação de

caudal, nomeadamente mecânicos (figura 2.27).

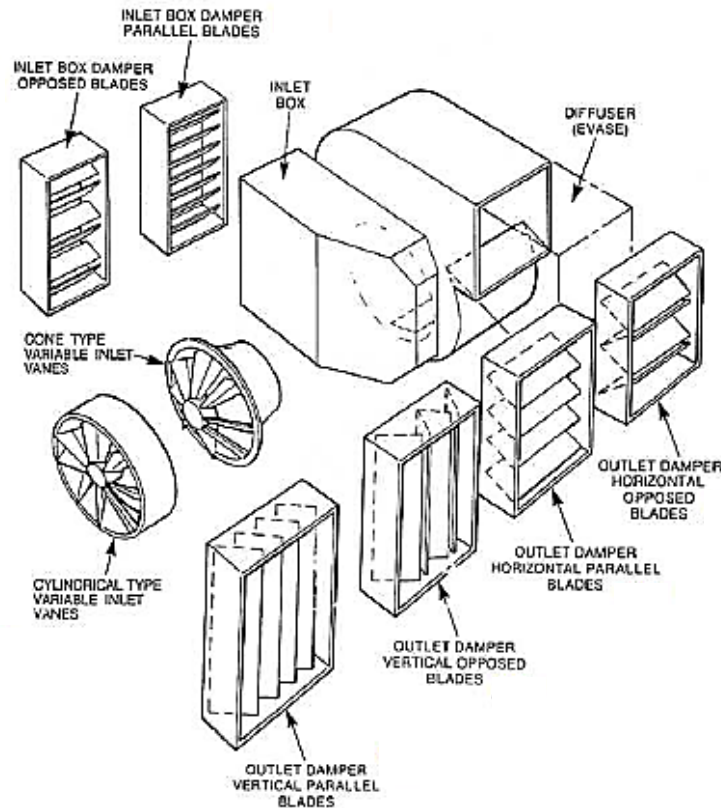


Figura 2.27: Dispositivos de regulação de caudal [51].

Com o ajuste do ângulo de pás de entrada (ou *inlet vanes*) e com persianas de saída (ou *outlet dampers*), que podem ser ainda paralelas ou opostas, é possível regular o caudal.

Perante diferentes técnicas de regulação, e para um certo caudal, serão solicitadas diferentes potências ao ventilador, já que diferentes técnicas introduzem diferentes valores de perdas. Para cada técnica de regulação (veja-se a figura 2.28), a forma como estas perdas evoluem com a redução de caudal também apresentam diferente característica.

Atente-se ao caso em que, para um determinado caudal, a válvula se encontra totalmente aberta. Ao ponto de funcionamento, corresponderá uma introdução mínima de perdas, e um caudal máximo. A potência exigida neste ponto, ao qual corresponde um caudal máximo, é semelhante para todas as técnicas. No caso das pás de entrada ou persianas de saída, neste ponto, existem perdas adicionais, o que se deve ao perfil alar das pás [50] (ver figura 2.28).

Ainda observando a figura 2.28, no caso da regulação por válvula, é possível observar que, embora haja um decréscimo da potência solicitada à máquina, à medida que a válvula se fecha, isto é, que o caudal é reduzido, as perdas relativas aumentam de forma significativa, ou seja, a eficiência do sistema decai. Este efeito é observável na figura, se se inspecionar e comparar os valores de potência para a curva de regulação de caudal através da variação de velocidade e por válvula, podemos afirmar, sem grande erro, que se

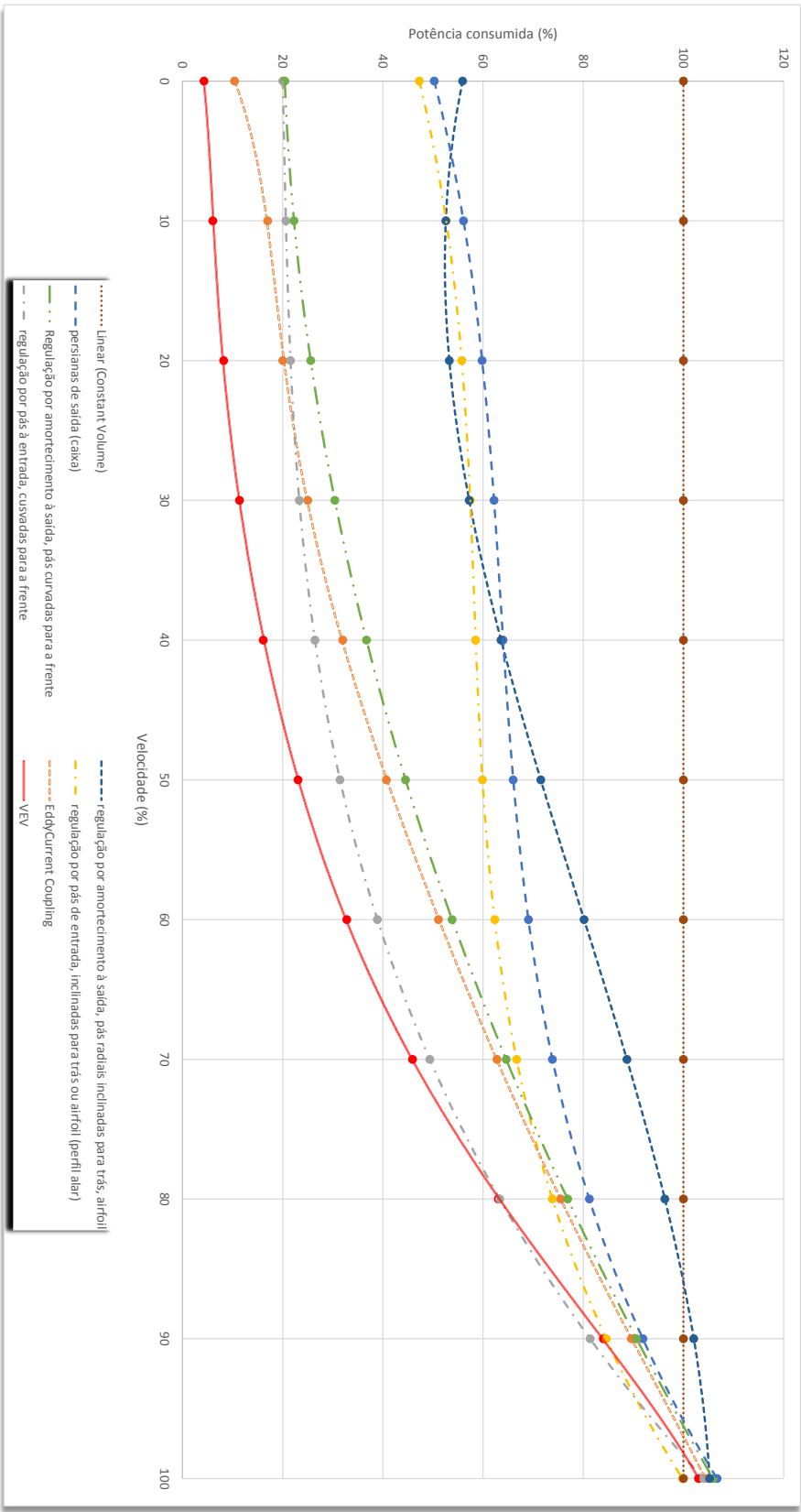


Figura 2.28: Curvas de potência em função da velocidade para diferentes dispositivos e técnicas de regulação de caudal.

traduzem nas perdas adicionais introduzidas pela válvula. Repare-se que estas crescem de forma significativa, à medida que se começa a reduzir o caudal.

É portanto, ainda possível concluir que, à medida que se reduz o caudal, os métodos de guiamento por pás ou persianas promovem igualmente um aumento das perdas. No entanto, o seu valor relativo, não cresce a uma ritmo tão elevado como no caso das válvulas.

Estas curvas permitem assim, obter um valor para a diferença de consumo energético, considerando a tecnologia instalada e tendo a curva da aplicação de VEV como referência. É possível denotar, observando a curva, que VEV se destaca como elemento mais eficiente em quase todo o espetro de velocidades.

Bombagem

Uma bomba centrífuga opera de forma similar a um ventilador centrífugo (ou um compressor centrífugo). As bombas são normalmente usadas para movimentar líquidos a determinada altura, ou para promover o aumento das pressões [50].

Num sistema de bombagem, a altura de energia, necessária para que num sistema circule caudal, é dada por:

$$H_{sist} = H_{est} + H_{perdas} \quad (2.27)$$

sendo,

H_{sist} - Altura do sistema [m];

H_{est} - Altura estática [m];

H_{perdas} - Altura de perdas ou altura dinâmica [m].

A altura de perdas pode ser traduzida pela expressão,

$$H_{perdas} = k \cdot Q^2 \quad (2.28)$$

A bomba terá que fornecer uma altura de energia que equilibre o sistema, isto é, $H_{bomba} = H_{sist}$.

H_{bomba} , a altura da bomba, ou altura manométrica, pode ser interpretada como sendo a energia útil fornecida pela bomba. É a energia usada para elevar o líquido através de uma altura geométrica (H_{est}) e compensar as perdas por atrito no sistema (H_{perdas}) [50].

O ponto de funcionamento, ou ponto de equilíbrio do sistema, traduz-se na interceção entre a curva característica da instalação e a curva da bomba, que corresponde a um determinado caudal (veja-se a figura 2.29). A instalação trabalhará no ponto P_f . A altura estática e as perdas são compensadas pelo trabalho desenvolvido pela bomba.

Como foi dito atrás, os sistemas de bombagem têm como objetivo debitar um certo caudal e vencer uma certa altura. É muito comum na indústria, encontrar um sobredimensionamento em relação a estas duas variáveis, por forma a que a instalação funcione

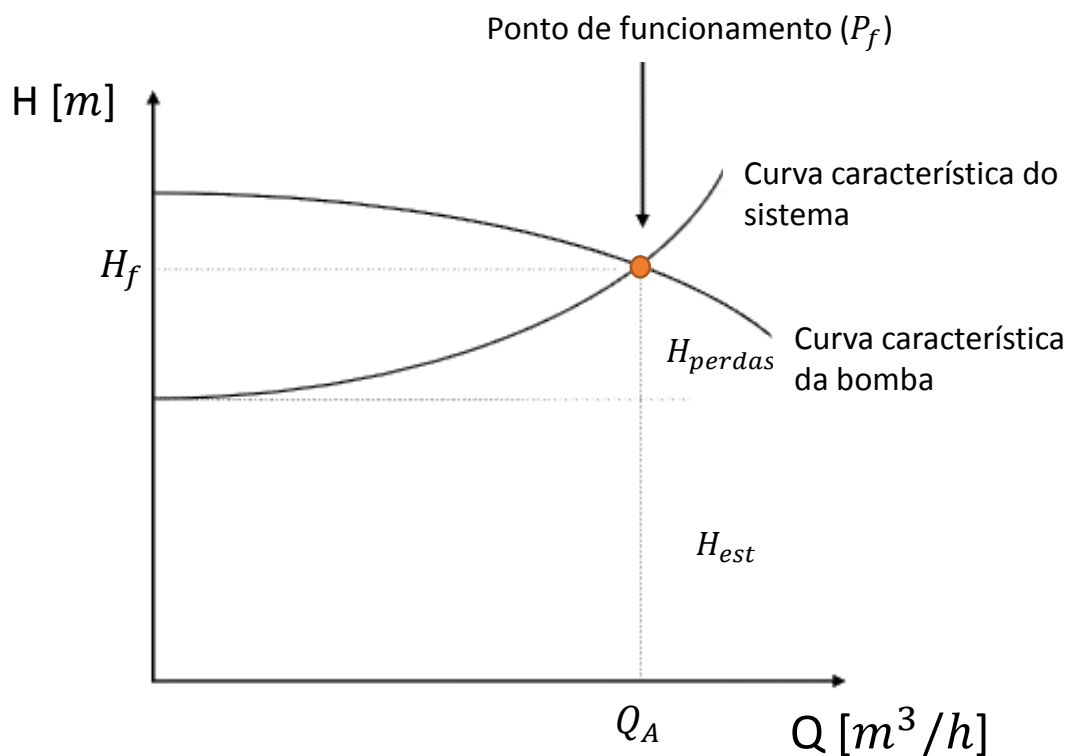


Figura 2.29: Ponto de trabalho. Curva característica da bomba e do sistema.

do "lado da segurança", ou precavendo regimes que poderá encontrar na sua vida útil [52].

A altura a vencer pelo caudal bombeado é determinada por excesso, uma vez que a parcela devida a eventuais perdas de carga na tubagem e devido a outros elementos, é obtida através de coeficientes, por sua vez já sobredimensionados. No fim do projeto é ainda atribuída uma percentagem adicional para aumentar a segurança do cálculo [52].

Como resultado desta prática habitual, tanto o caudal como a altura acabam sobrestimados, pelo que na prática, a curva real de funcionamento do sistema passa a funcionar com alturas menores para o mesmo caudal. Para que a bomba escolhida funcione efetivamente nas condições pretendidas, terá que haver a introdução de perdas adicionais, conseguida normalmente através de técnicas de estrangulamento mecânico.

A potência mecânica solicitada à bomba é proporcional ao produto da altura pelo caudal a dividir pelo rendimento da bomba. É dedutível ainda, atentando às equações 2.27 e 2.28, que esta potência variará com Q^3 , já que a altura de perdas aumenta com Q^2 .

$$P_{mec} = \frac{\rho \cdot H \cdot Q \cdot g}{\eta_{bomba}} \quad (2.29)$$

sendo,

P_{mec} - Potência solicitada à bomba [kW];

ρ - Densidade, ou massa específica do fluido [$\frac{kg}{m^3}$];

H - Altura manométrica [m];

g - aceleração da gravidade [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$];

η_{bomba} - Eficiência da bomba.

A potência que se desperdiça pode ser traduzida como o produto do caudal pela diferença de alturas, dividido pelo rendimento da bomba. Repare-se que quanto maior for H_{perdas} relativamente a H_{est} , maior a parcela de energia que não está a realizar trabalho útil, logo mais aliciante se torna investir na otimização do sistema, pois maior é a margem para reduzir perdas.

$$P_{perdas} \propto \frac{(H - H_{est}) \cdot Q}{\eta_{bomba}} \quad (2.30)$$

Para que o sistema sobredimensionado trabalhe no ponto pretendido, é comum efetuar-se a regulação de caudal através de processos de estrangulamento, por válvula por exemplo. Este fim pode também ser atingido através de sistemas de recirculação (*Bypass*).

Na figura 2.30, se se considerar P_A , como o ponto para o qual a válvula se encontra totalmente aberta, este corresponderá ao ponto de caudal máximo. À medida que a válvula é fechada, definem-se curvas para o sistema com inclinações cada vez maiores, mas sempre com o ponto de caudal nulo em comum. Este efeito é consequência do aumento valor do termo KQ^2 na equação 2.28.

O ponto de funcionamento desloca-se assim, de P_A para P_B , levando à redução de caudal (mas a um aumento da altura manométrica e da pressão [52]).

Embora usando uma válvula regulação, haja um decréscimo do caudal, e até uma diminuição da potência solicitada à bomba, este decaimento no consumo mostra-se diminuto, para o mesmo débito, quando comparado com outros métodos.

Segundo [52], as perdas devido à regulação por estrangulamento de caudal, rondam em média, os 20% de toda a energia consumida pelos sistemas de bombagem. Daqui infere-se que as soluções de estrangulamento mecânico do caudal, são elementos bastante ineficientes.

É possível ainda acrescentar que, quanto mais abaixo da capacidade nominal funciona a instalação, mais ineficiente se torna esta medida. O mesmo é verdade quanto maior for a variabilidade de carga do sistema.

Uma alternativa a esta prática é a regulação de caudal pela variação de velocidade de rotação da bomba. Desta feita, não será alterada a curva característica do sistema de bombagem, mas sim a curva da própria bomba (ver figura 2.31), sendo possível a regulação para o mesmo débito pretendido, mas originando uma redução da altura manométrica e da pressão associado à redução de caudal.

Repare-se que na figura 2.31, a curva característica do sistema não se altera, ao invés do que acontece na aplicação de métodos de estrangulamento. Agora é a curva da bomba

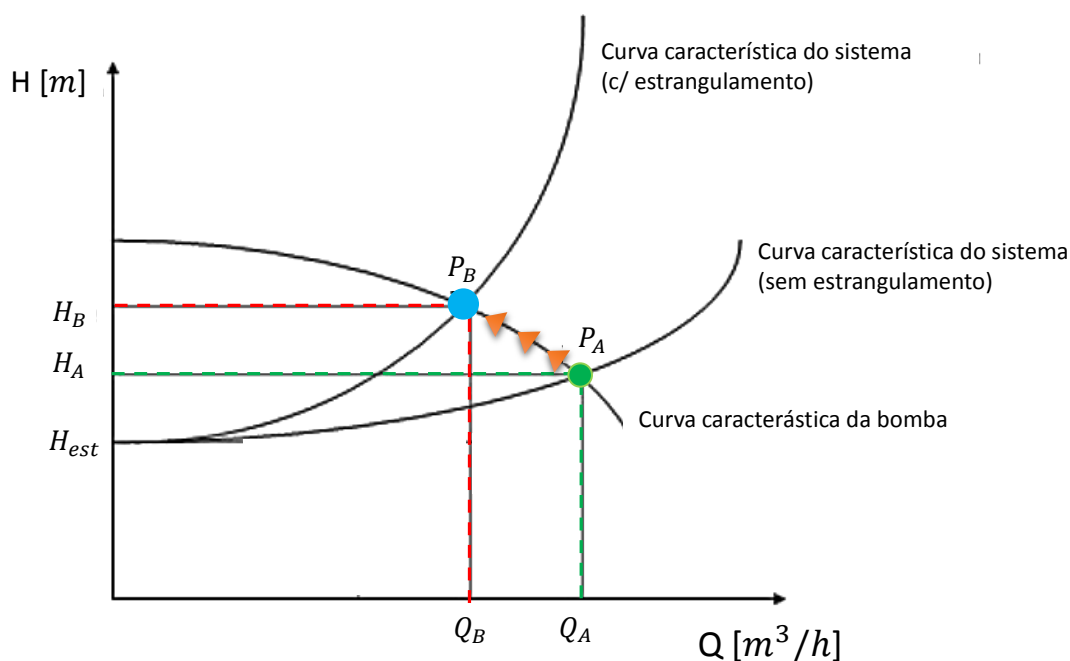


Figura 2.30: Efeito do estrangulamento por válvula para regulação de caudal.

que sofre alteração, com a redução de velocidade. À medida que se reduz a velocidade de rotação, a curva da bomba sofre transformação, apresentando alturas manométricas cada vez menores.

Nesta situação não existe alteração do coeficiente de atrito presente no termo KQ^2 , que é característico do sistema, mas pela redução de caudal, virá uma redução considerável da altura de perdas, H_{perdas} . Assim se conclui que a regulação de caudal pela redução de velocidade do rotor da bomba, constitui uma abordagem muito mais eficiente.

É usual, em medidas deste género, atingir rendimentos da instalação bastante superiores (passando dos 30% para os 70% [52]), e daqui advêm reduções no consumo energético.

Ainda assim, não se deve ignorar, e há que ter em consciência, que se está a levar a bomba para um ponto de funcionamento fora do nominal (observe-se a figura 2.32). No entanto, na grande maioria dos casos, os ganhos de eficiência no sistema, compensam largamente a redução do rendimento da bomba a uma velocidade mais reduzida.

Atualmente, a opção que se traduz em melhores resultados é a variação de velocidade da bomba através da variação de frequência de alimentação do motor que a aciona. Existem outros mecanismos eletromecânicos, capazes de variar a velocidade do rotor da bomba conhecidos como *Eddy Current Clutch*, ou *Torque Converter*, normalmente instalados como acoplamento entre o rotor do motor e o da bomba, mais eficientes do que as válvulas de estrangulamento, mas com rendimento inferiores à regulação por VEV.

Na figura 2.33, é possível observar simultaneamente as curvas que ditam a potência elétrica absorvida em função do caudal, recorrendo a diferentes tecnologias (com sistema

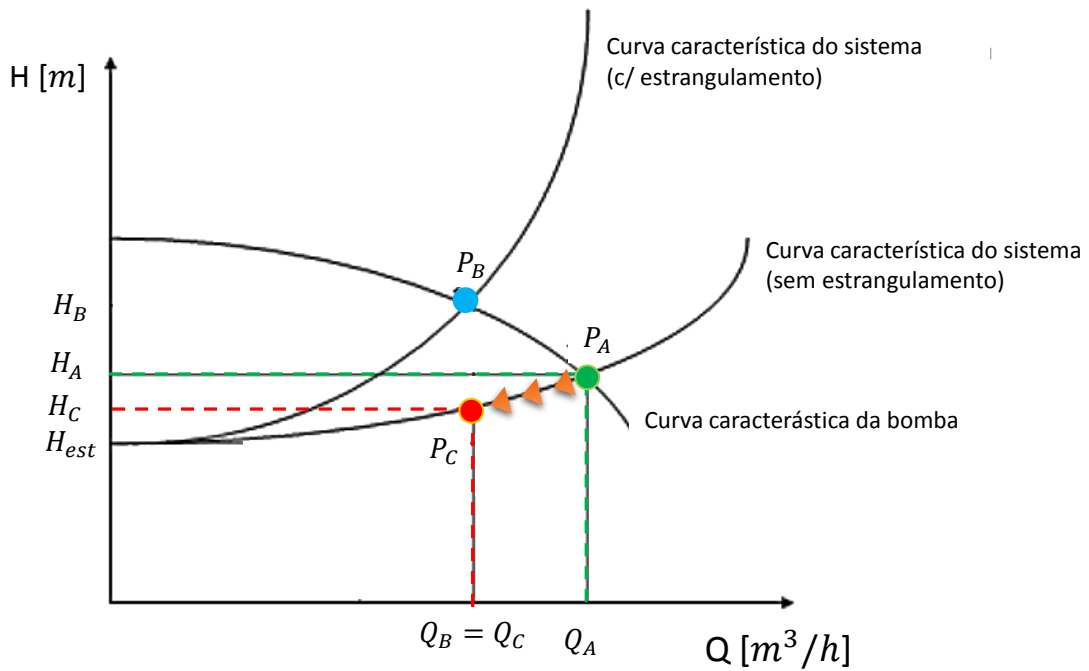


Figura 2.31: Efeito da redução de velocidade de rotação da bomba.

de recirculação, por estrangulamento com válvula, variação de velocidade do motor por VEV, ou a jusante do motor através de *Eddy Current Clutch* ou *Torque Converter*).

Estas são curvas teóricas, mas oferecem uma representação fiel da variação do consumo, em função da regulação do caudal.

É pertinente referir que, tendo o VEV a capacidade de adaptar a velocidade do motor (e portanto da bomba) às necessidades de débito da instalação, a curva de consumo do sistema em função do caudal será muito semelhante à apresentada na figura 2.18.

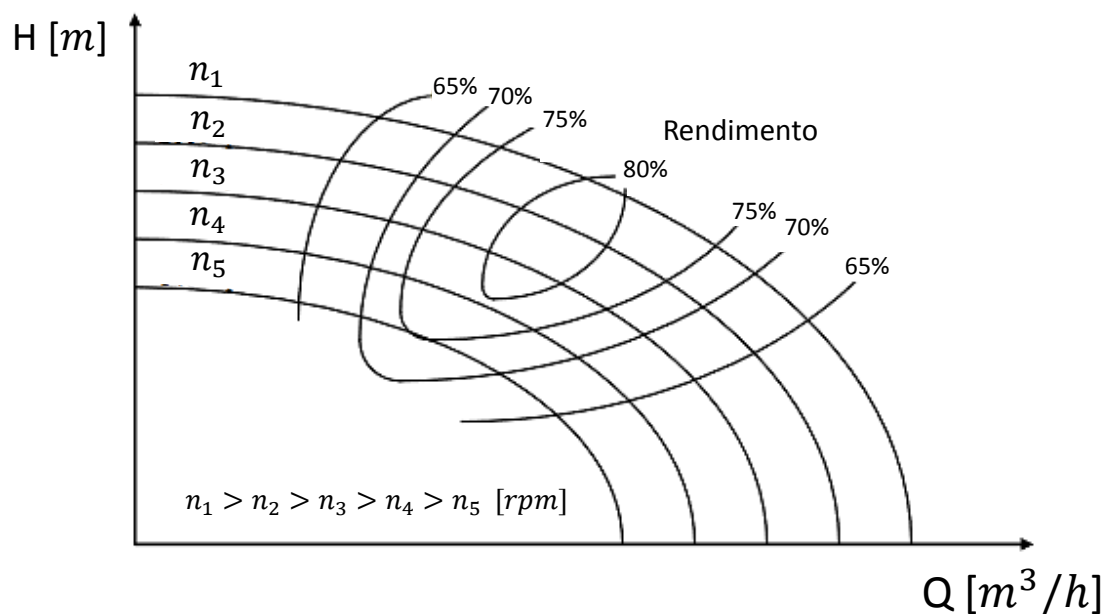


Figura 2.32: Efeito da redução da velocidade na curva característica da bomba, e na redução da sua eficiência.

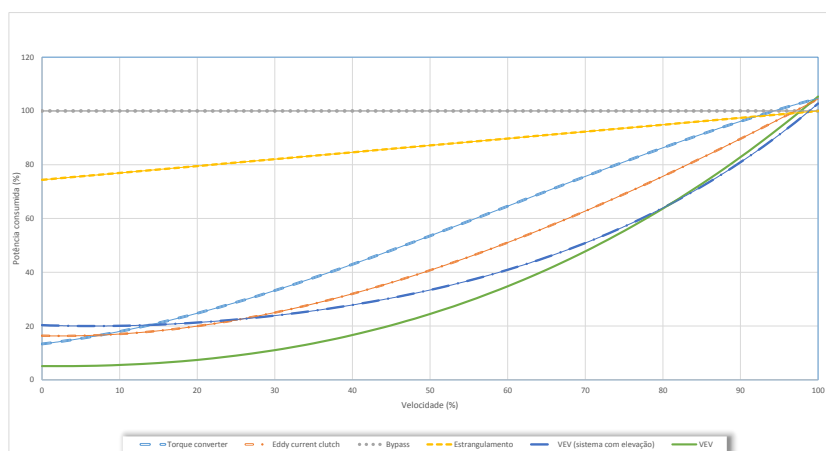


Figura 2.33: Curvas de consumo em função do caudal.

Estas curvas tomam extrema importância, pois tornam possível a obtenção de uma estimativa, do ponto de vista energético, da melhoria nos consumos do sistema de bombagem, tendo em conta a aplicação de uma técnica de regulação de caudal em detrimento de outra.

Esteiras transportadoras

A esteira transportadora, na figura 2.34, é um sistema típico de conversão de energia

elétrica em energia mecânica. A sua eficiência pode ser melhorada e está dependente (tal como noutros tipos de sistema) de quatro principais aspetos:

1. Performance;
2. Operação;
3. Equipamentos;
4. Tecnologia.

Estes sistemas estão normalmente associados a cargas de binário constante. Nestas aplicações, o binário é praticamente independente da carga transportada.

Na indústria, muitos sistemas deste tipo ainda laboram a velocidade constante. Assim é possível, através de controlo programável proporcionado por um VEV, manipular automaticamente a velocidade da esteira. A velocidade pode ser adaptada à necessidade de produção, ou à taxa de *feed* de uma matéria prima ou peça na esteira.

A redução energética neste tipo de aplicação vem proporcional à redução de velocidade, pelo que não se torna tão aliciante o investimento num VEV neste tipo de aplicações em comparação com as referidas nas secções anteriores. Ainda assim, os VEV podem tomar um papel importante no controlo de processo, ou na garantia do bom estado de conservação da carga que transportam, e dos componentes mecânicos, devido à função de arranque e paragem suave.

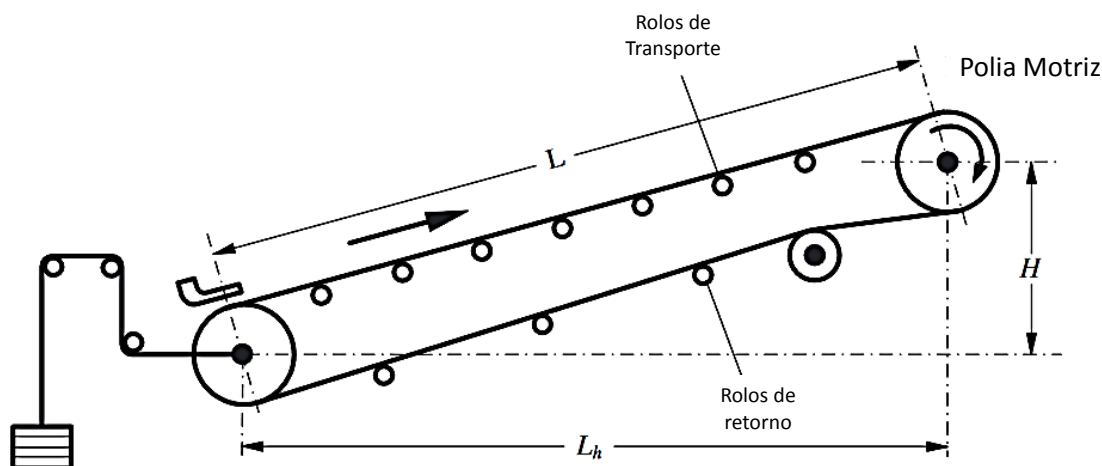


Figura 2.34: Esteira transportadora [53].

Perante condições de operação estacionárias, o consumo de energia de um sistema que aciona uma esteira transportadora pode ser determinado por um modelo empírico sugerido em [54][55]. A potência mecânica exigida pela esteira transportadora, em condições de carga constante, pode ser dividida em três partes:

1. A potência necessária para acionar a esteira transportadora em vazio, P_{ec} ;

2. A potência necessária para mover horizontalmente a matéria prima a transportar uma certa distância (L_h), P_h ;
3. A potência necessária para elevar o material a uma certa altura H , P_l .

São considerados também todos os acessórios que contribuem para o consumo total do sistema e consideradas outras perdas, que são tratadas como P_{Acs} .

A potência exigida pela esteira vem então,

$$P_{et} = P_{ec} + P_h + P_l + P_{Acs} \quad (2.31)$$

P_{ec} , P_h e P_l podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$P_{ec} = gf(L_h + L_0)QV \quad (2.32)$$

$$P_h = gf(L_h + L_0)\frac{T}{3.6} \quad (2.33)$$

$$P_l = gH\frac{T}{3.6} \quad (2.34)$$

onde,

L_h - distância horizontal entre as polias [m];

L_0 - Distância adicional de compensação [m];

T - Taxa de alimentação da esteira transportadora [t/h];

V - Velocidade linear da esteira [m/s];

f - fator de atrito.

Com $Q = Q_{ro} + Q_{ru} + 2Q_B$ e,

Q_{ro} - Contribuição da parte rotativa dos rolos transportadores [kg/m];

Q_{ru} - Contribuição dos rolos de retorno [kg/m];

Q_B - Contribuição da esteira [kg/m].

Este modelo é consistente com o que foi mostrado na secção 2.4.3. Repare-se que em condições de operação estacionárias, a potência depende apenas da velocidade e de forma linear.

Em esteiras com elevada velocidade, cargas de grande inércia, e frequentes arranques e paragens em regime de funcionamento constante, é possível obter ganhos substanciais através de travagem regenerativa, o mesmo é verdade para grande parte das aplicações de binário constante (elevadores são outro exemplo).

Os ganhos energéticos neste tipo de aplicação estão limitados aos trâmites do controlo de processo. Repare-se que normalmente, as esteiras transportadoras são parte constituinte de um sistema mais complicado, sendo por vezes complexo fazer modificações a

nível de processo fabril. É por isto que na prática se torna mais simples, e é mais comum, melhorar a eficiência dos componentes do sistema (onde se inclui o sistema motriz, polias e da própria esteira).

Cada caso, tem de ser estudado de forma particular. A título de exemplo deixam-se problemas ou restrições que devem ser tidas em conta, quando se procuram oportunidades de otimização de um sistema deste tipo:

1. Baixa taxa de alimentação do tapete ou baixa ocupação, poderá significar uma velocidade demasiado elevada ou um *feed rate* demasiado baixo;
2. Para taxas de alimentação não controláveis, a velocidade do tapete deverá adaptar-se à carga;
3. Há que ter em conta três restrições na otimização: Velocidade máxima, taxa de alimentação da esteira máxima, e objetivos de produção diária;
4. Adaptar o volume de produção, tendo em conta as tarifas horárias (aumentar o volume de produção nas horas de Vazio (aumentar velocidade));
5. Ter em conta a possibilidade de diminuir as rampas de aceleração.

Na maioria da literatura disponível, são estudados casos de baixa complexidade, sem as restrições inerentes ao processo.

Mesmo assim, torna-se pertinente referir que, quanto mais variável for a gama de velocidades que o processo exige, mais viável será a aplicação de variação de velocidade. O número de horas anuais de funcionamento da aplicação é um fator de decisão, no que ao investimento diz respeito.

Moinhos

A variação de velocidade em motores de moinhos, tem um papel preponderante no âmbito do controlo de processo. Nestas aplicações, o controlo de velocidade, permite o ajuste da velocidade de rotação dos moinhos em função da curva de moagem, dependente da matéria prima. Pretende-se obter as condições ótimas de moagem, ou por outro lado, obter uma otimização da relação de granulometrias, a qual é função da velocidade de rotação.

É necessário determinar, normalmente através de processo experimental, as velocidades de rotação adequadas para cada uma das fases de comunicação do material, com o intuito de aumentar a eficácia da ação do material moente, sobre a matéria a moer e, por conseguinte, a eficácia do processo [52].

Em sistemas convencionais, em que se mantém uma velocidade constante do moinho, não é possível fazer o ajuste da ação de moagem às dimensões que o material assume com o decorrer do tempo de operação.

Na indústria cerâmica, por exemplo, é comum o uso de moinhos do tipo de bolas ou de *Alcing*, na obtenção de pastas e para atuar em materiais a moer como a sílica, calcite, dolomite ou feldspato [52] [56]. Estes moinhos são constituídos por um cilindro oco, de metal, com eixo horizontal e a sua velocidade pode ser referida em função à sua velocidade angular crítica, ω_c . Esta é a velocidade à qual as componentes da força centrífuga e do peso se igualam, resultando nula a ação de moagem (os materiais estão parados em relação às paredes do moinho). ω_c depende do diâmetro interno do moinho, D_{int} .

$$\omega_c = \frac{42,3}{\sqrt{D_{int}}} \quad (2.35)$$

A velocidade do moinho deve ser regulada com base num critério de desenvolvimento da ação de moagem, na qual predomina, numa primeira fase, o esmagamento ou quebra do material (*à priori* de maiores dimensões). Neste tipo de moinhos, a fase de esmagamento requer velocidades superiores, tendo que ser suficiente para que, por ação da gravidade, os corpos moentes e o material a moer subam as paredes do moinho e caiam, provocando o esmagamento do material.

Numa segunda fase, predomina o atrito (devido ao rolamento das bolas umas sobre as outras), de modo a homogeneizar as dimensões finais. O estudo das curvas de moagem, e o controlo de velocidade em consonância torna possível aumentar o rendimento do processo (obtendo retorno a nível de economia energética e do tempo de moagem)[52].

As melhorias vêm pelo aumento da eficácia do processo, isto é, ainda que possa haver um aumento de consumo elétrico (instantâneo, na fase de esmagamento), a quantidade de energia requerida por kg de material moído (kWh/kg_{util}) será menor.

Em [52], é possível observar um caso experimental, onde se atua num processo de moagem de sílica, num moinho de 38000 litros. O processo antes da aplicação de velocidade variável, possuía uma duração de 9,67horas para obter uma fração residual de matéria no peneiro a $45\mu m$ de 9%, com uma velocidade constante de 13,8 rpm, perfazendo 8000 rotações completas.

Neste caso, depois de alguns testes, obtém-se para a curva do número de revoluções em função da velocidade de rotação, a sequência de velocidades que melhor eficácia confere ao processo, conforme figura 2.35.

Repare-se que a curva final, a de **maior eficiência**, a fração residual de referência, 9%, é atingida às 6750 revoluções, em vez das 8000 anteriores à aplicação da medida (figura 2.36), **reduzindo-se o tempo de moagem** em 13,6%, e o **consumo energético** em 8,9% (1,33h e 60kWh respetivamente).

Embora se obtenham moagens rápidas com o moinho a trabalhar em baixa ocupação (< 10%), acelerando a fase de esmagamento, em termos de rentabilidade económica, um maior rendimento vem para ocupações mais elevadas ($\sim 25\%$), sendo por isso usual

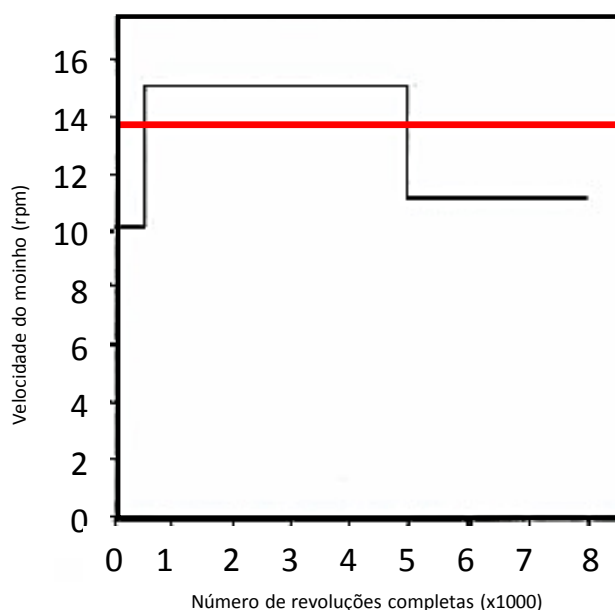


Figura 2.35: Velocidade de rotação do moinho em função do número de revoluções completas desde o início da moagem. A vermelho a situação pré-intervenção, a traço negro a curva para a qual se obtém a otimização do processo com variação de velocidade (adaptado de [52]).

encontrá-las na indústria, **aumentando a competitividade e diminuindo o custo final do produto.**

A aplicação de variação em moinhos deste tipo, acarreta não só as vantagens acima referidas, como confere ao sistema **elevada versatilidade**, sendo possível ajustar o processo a diferentes materiais a moer, sem perda de eficiência, ou eficácia da ação, e às dimensões iniciais do material a moer.

Um exemplo desta versatilidade pode ser observado em [57]. Neste caso, o moinho em causa trabalha regularmente em diferentes condições de operação, devido às diferentes matérias primas a moer, de diferentes dimensões e diferentes durezas.

De salientar, que **o VEV pode se programado** para trabalhar em horas em que os custos energéticos são mais favoráveis.

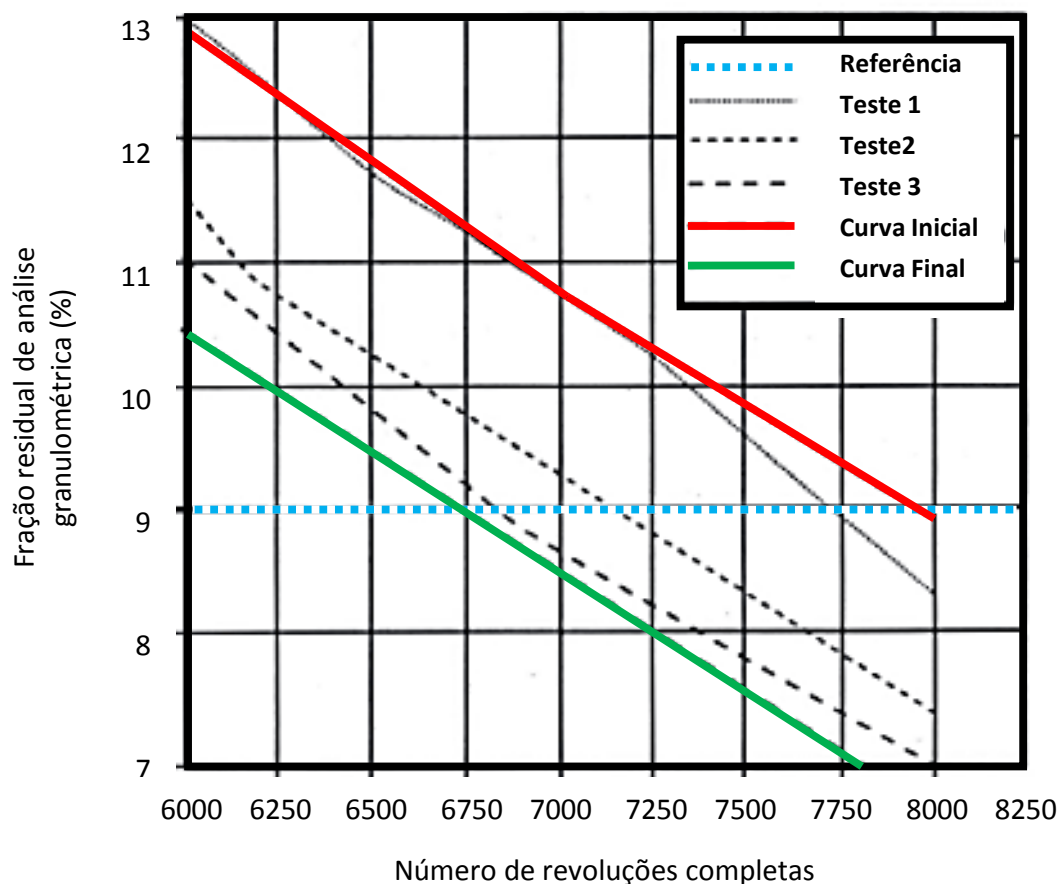


Figura 2.36: Representação da percentagem de matéria residual no peneiro em função das revoluções completas do moinho. A vermelho a evolução da percentagem de material com granulometria acima do pretendido para a situação pré-intervenção, a verde a curva com controlo de velocidade do moinho otimizado (Adaptado de [52]).

Em termos de retorno de investimento, a aplicação da variação de velocidade fará apenas sentido para moinhos de grande calibre (na ordem dos 35000 L) [52].

Bobinadoras

A bobinagem consiste num processo produtivo, intermédio ou no final de um sistema mais complexo, onde materiais como papel, plástico, metais ou tecidos são transformados. A bobine produzida pode ser o produto final, ou na maioria dos casos toma parte integrante de um processo de produção.

Sendo parte de um processo, o acionamento deve estar em “sintonia” com o resto do sistema. O controlo toma extrema importância e pode ser otimizado com recurso a um variador de frequência, controlando um motor de indução [58].

Segundo [58], deve-se garantir que a bobinadora trabalha a potência constante.

Dar-se-á o exemplo na produção de bobinas de aço na indústria metalúrgica.

De modo a garantir a preservação das propriedades mecânicas e magnéticas da tira metálica, no processo de bobinagem, deve ser garantida a aplicação de uma força o mais constante possível à tira.

Em sistemas de bobinamento de tiras metálicas, normalmente os rolos são formados sob considerável tensão [59]. Nestes sistemas, a tensão aplicada à tira deve ser mantida aproximadamente constante. Isto é conseguido através do decréscimo gradual da velocidade angular diretamente proporcional ao aumento do diâmetro da bobina.

Da mesma forma, controlando a velocidade angular do rolo, em função do diâmetro adicional devido ao enrolamento do material, é possível (e mandatário) que a velocidade linear de bobinagem se mantenha constante (veja-se que $v(t) = \omega_{bob}(t)(r_2 + r_b(t))$) [60].

Estes sistemas apresentam em grande parte dos casos, caixas redutoras. Repare-se que no caso concreto, e devido à densidade volúmica deste tipo de materiais (metais ou ligas metálicas), o sistema ganha um cariz de componente inercial bastante significativo.

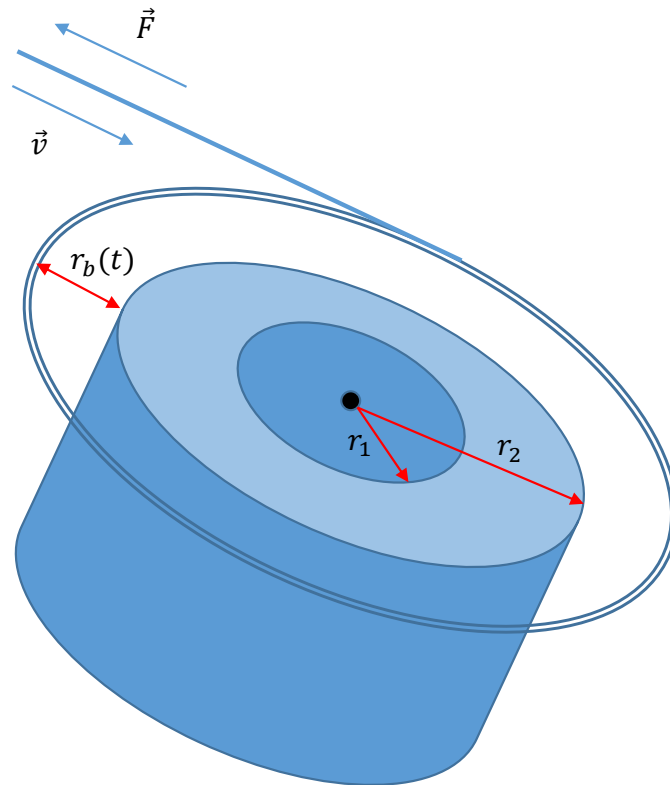


Figura 2.37: Representação de uma bobinadora. r_1 , raio interno. r_2 , raio externo. $r_b(t)$, raio adicional devido ao material bobinado em função do tempo. \vec{F} , força aplicada à tira. \vec{v} , velocidade linear [61].

Por forma a manter velocidade linear, tensão na tira e a potência constante, o binário variará de acordo: Aumentando para velocidades angulares menores.

Atenção que, para o caso em questão, poderá fazer mais sentido considerar uma abordagem do ponto de vista do funcionamento dinâmico do motor, já que é constante a variação da velocidade angular. O binário possuirá sempre uma componente relativa ao momento de inércia do rolo, que não é de todo constante. Relembre-se que,

$$T_m = J\dot{\omega} + T_r \quad (2.36)$$

Por um lado, há que ter em conta que a velocidade angular decresce em função do raio $r_2 + r(t)$. Numa primeira fase, a taxa a que ω_{bob} varia será mais elevada, decrescendo à medida que o raio cresce (para uma velocidade angular cada vez menor, o raio $r(t)$, crescerá cada vez mais devagar).

Como o momento de inércia varia com a massa da bobine, e esta cresce linearmente com o tempo, J também será função do tempo, e não constante (apenas a componente referente ao momento de inércia característico do motor será constante).

Em [61], vem para o binário de carga,

$$T_c(t) = \frac{F}{i}(r_2 + r_b(t)) \quad (2.37)$$

com,

T_c - Binário de carga exigido ao motor [Nm];

F - Tensão mecânica aplicada à tira metálica(que se considera constante) [N];

i - Relação de redução de velocidades da caixa.

Estas grandezas estão representadas na figura 2.37.

Repare-se que o raio aumenta de forma inversamente proporcional à velocidade angular,

$$r_2 + r_b \propto \frac{1}{\omega} \quad (2.38)$$

Logo, é possível inferir então, que o binário resistente variará de forma inversamente proporcional à velocidade angular. Este fenómeno é consistente com o observado na secção 2.4.

Deixam-se por fim gráficos da variação das grandezas de interesse (figura 2.38), presentes no processo de bobinagem. Mais uma vez, confirma-se a tese apresentada na secção 2.4.4.

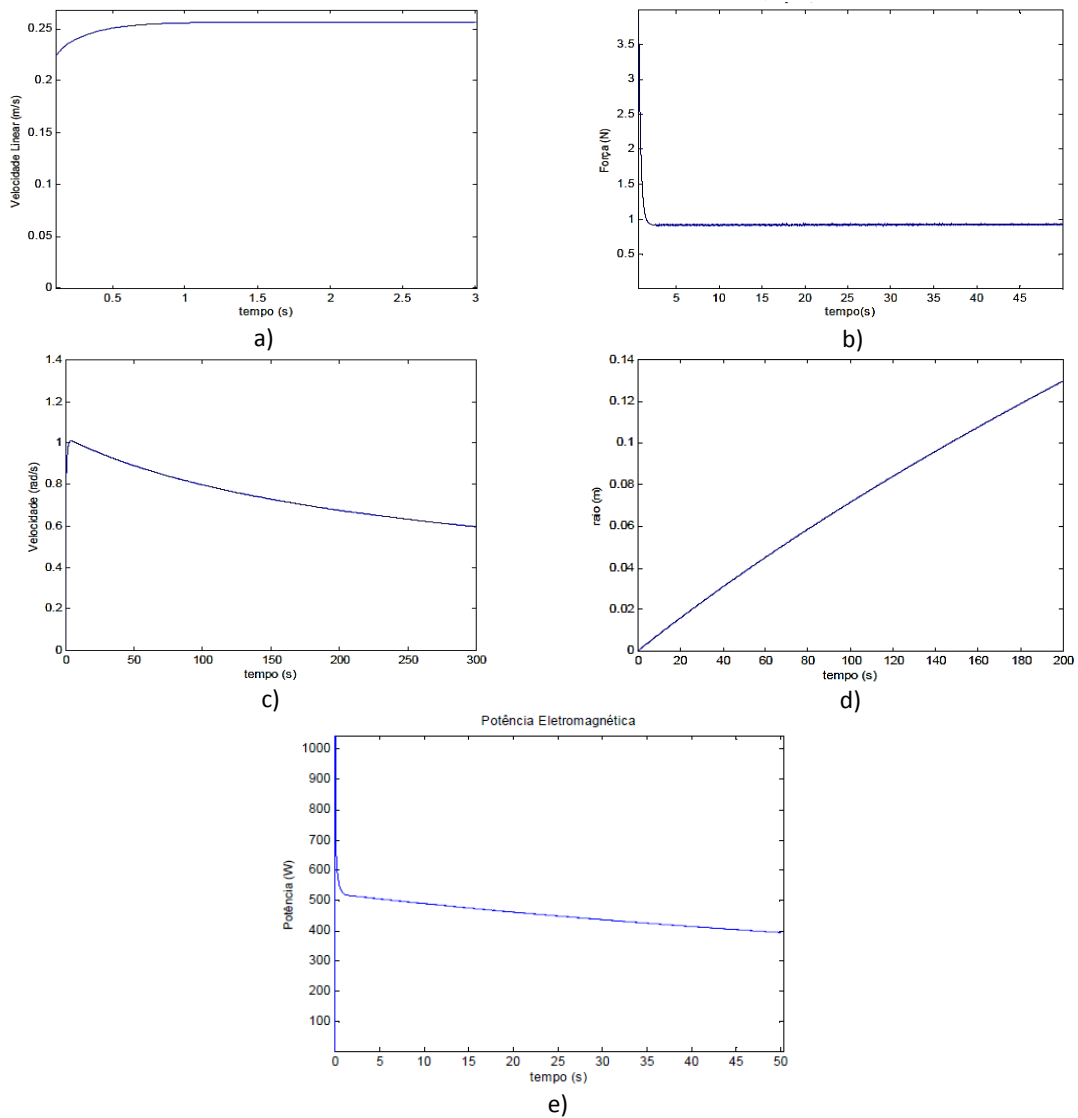


Figura 2.38: Evolução do valor das grandezas de interesse para uma bobinadora do tipo axial, em função do tempo. (a) Velocidade linear do rolo $[m/s]$. (b) Força aplicada à tira $[N]$. (c) Velocidade angular $[rad/s]$. (d) Variação do raio adicional devido ao material bobinado $[m]$. (e) Potência eletromagnética desenvolvida $[W]$. (adaptada de [61])

2.5 Variador Eletrônico de Velocidade

Atualmente, os dispositivos conversores de frequência, ou variadores eletrônicos de velocidade revelam-se como a tecnologia de variação de velocidade em sistemas eletromotriz mais eficiente.

Em relação às demais alternativas, elétricas ou mecânicas, estes conversores são os que introduzem menos perdas, e que portanto menos afetam o rendimento global de um sistema eletromotriz. Estes dispositivos são capazes, através de técnicas de controle, com rápida resposta dinâmica [44], fazer um ajuste adequado e contínuo de velocidade

e de binário desenvolvido, em relação à carga mecânica imposta, ou em alguns casos, pretendida ou apenas necessária.

O controle por frequência é uma técnica conhecida há décadas, mas a sua viabilidade é relativamente recente, quer em termos económicos, quer tecnológicos [44]. Os variadores eletrónicos de velocidade são dispositivos que reforçam a sua posição no mercado devido à evolução da eletrónica de potência.

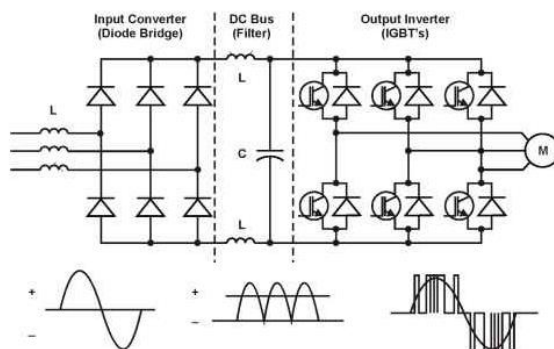


Figura 2.39: Conversor de frequência [62].

Um VEV, é normalmente constituído por três módulos, ou andares típicos: 2 conversores de potência (um retificador e um inversor), e um filtro DC.

O **andar retificador** ou conversor AC-DC, a montante, tem como função converter ou retificar as grandezas sinusoidais da rede numa onda aproximadamente contínua. Este tipo de conversor (no lado esquerdo da figura 2.39) pode ser implementado por exemplo, por díodos de potência ou tirístores [44]. Nestes últimos, o valor eficaz da tensão pode ser controlada, através do ângulo de disparo dos tirístores (figura 2.40).

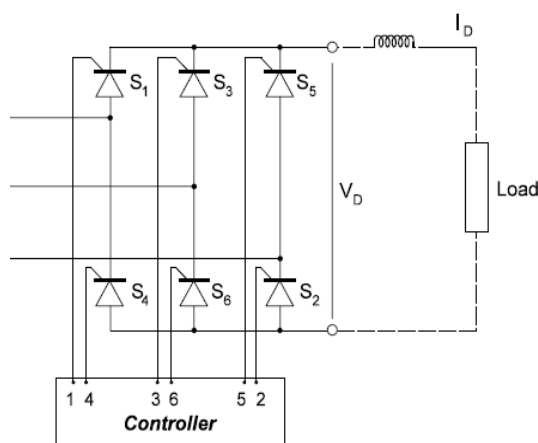


Figura 2.40: Retificador implementado com tirístores, com controlo do ângulo de disparo [62].

Entre o retificador e o ondulator existe normalmente, um **filtro DC**, que permite diminuir o ripple da onda retificada.

O andar de saída, conhecido como **inversor**, na figura 2.41, é responsável por transformar a tensão contínua em alternada – este dispositivo também é conhecido como ondulator. É tipicamente implementado, usando transístores de potência BJT, IGBT ou MOSFET em paralelo díodos de roda livre.

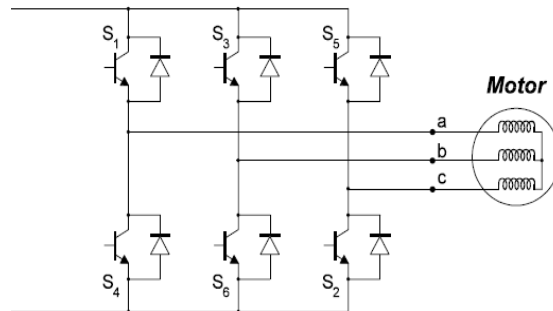


Figura 2.41: Ondulador implementado com transístores e díodos de roda-livre [62].

O comando, que define a característica das ondas de saída, é dado por impulsos aplicados na base dos transístores. Para que seja fornecido, ao motor, um sistema de tensões e correntes trifásicas aproximadamente sinusoidal, os transístores são comutados com sinais gerados por um micro-controlador digital. A técnica *standard*, e mais usada é a *Pulse Width Modulation (PWM)* ou Modulação por Largura de Impulso [63].

Os algoritmos PWM, têm vindo a ser otimizados com o intuito de melhorar as formas de onda de saída. Trabalhando a frequências de comutação suficientemente altas, na ordem dos kHz, é possível obter uma forma de onda, cuja influência do conteúdo harmónico no funcionamento e na eficiência do motor será reduzido [44]. As altas frequências PWM conduzem a problemas de interferências eletromagnéticas. O tema da compatibilidade eletromagnética será abordado mais à frente.

2.5.1 Modulação por Largura de Impulso

Os conversores, ou onduladores de tensão, já referidos neste capítulo, admitem uma tensão imposta em DC e correntes bidirecionais impostas em AC.

Estes onduladores, são implementados com dispositivos comutáveis (MOSFET, IGBT, GTO), permitem obter uma construção automática de um sinal de tensão AC.

Com o mínimo de seis manobras por período é possível gerar um sistema trifásico de tensões AC retangulares. No entanto, na alimentação de uma máquina de indução, o objetivo é a obtenção de tensões trifásicas sinusoidais. Com seis manobras por período obter-se-á elevada distorção, e um consequente elevado conteúdo harmónico em todo o espetro de frequência.

Com este método, e através do também conhecido como conversor PWM, é possível variar a frequência do sinal de tensão, através da variação da frequência de *switching*,

controlando-se o respetivo *duty-cycle* ou o ângulo de disparo do dispositivo de comutação.

Na sua generalidade, as técnicas de Modulação por Largura de Impulso (PWM), pretendem à custa de tensões sintetizadas, elaborar uma evolução o mais sinusoidal possível das correntes.

Os métodos que melhor cumprem este objetivo, assentam no aumento do número de quantidade de manobras por período, ou de outra forma, num valor elevado da frequência de *switching*. As tensões produzidas serão assim constituídas pela componente fundamental e harmónicas de elevada ordem.

Para conhecimento e dentro das variantes de técnicas PWM, destacam-se duas classes[47]:

1. Padrão Global pré-Calculado;
2. Modulação por sub-Harmónica:
 - Modulação sinusoidal clássica;
 - Modulação vetorial.

2.5.2 Controlo V/f

Conhecido na indústria como Controlo V/f, através variação simultânea de tensão e frequência, esta técnica deriva do interesse em garantir no funcionamento da máquina de indução trifásica, de modo que:

1. Se mantenha o fluxo nominal no entreferro;
2. Se garanta o funcionamento da máquina com pequeno escorregamento.

Enquanto a necessidade de garantir o fluxo nominal no entreferro tem em vista a disponibilização do binário máximo da máquina sem que esta sofra saturação, o facto de se valorizar um pequeno escorregamento tem como objetivo a não degradação do rendimento da máquina [2].

Relembre-se que (de forma algo grosseira):

$$\lambda \approx 1 - s \quad (2.39)$$

Considerando esquema equivalente da máquina, veja-se também que o fluxo de magnetização (entre o estator e o rotor e desprezando a resistência e a impedância de magnetização no estator), vem [47]:

$$\Psi_m \approx \frac{U_s}{\Omega_s} \quad (2.40)$$

Para que se trabalhe abaixo da velocidade nominal e com pequeno escorregamento, com uma tensão de entrada no motor de frequência ω_s , esta frequência terá de ser ajustada de

acordo com a velocidade mecânica pretendida. Na figura 2.42, as curvas características correspondentes a ($\omega_s < \omega_n$), são teóricas, pois o modelo de *Steinmetz*, ao qual se recorreu para a construção destas curvas, não contempla a característica de saturação da máquina, e é apenas por isso que apresenta binários tão elevados.

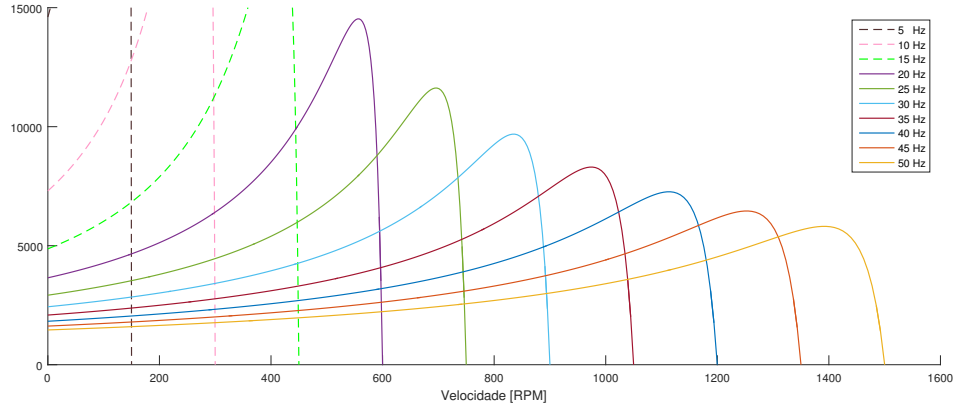


Figura 2.42: Curvas de binário em função da velocidade com $U_s = U_n$ e frequência variável, ignorando-se o efeito de saturação (todo o traçado, além do correspondente à frequência nominal é teórico/fictício).

No entanto, na prática, se a tensão eficaz for mantida constante ($U_s = U_n$), e a frequência das tensões for reduzida, a máquina saturará (equação 2.40). Funcionando desta forma a máquina apresentará perdas elevadas.

Na realidade, na condição de saturação, a máquina estará limitada a valores de fluxo pouco maiores do que para $\omega_s = \omega_n$ [47].

Mantendo a razão constante entre U_s e ω_s , consegue-se assegurar (para gamas de frequência abaixo da nominal), o fluxo praticamente constante. Ainda assim, a baixas frequências, a queda de tensão nos enrolamentos do estator é muito maior que a impedância de magnetização (quando $\omega_s \rightarrow 0$, $R_s \gg \omega_s X_m$). O fluxo torna-se demasiado reduzido, dando origem a um baixo binário disponível.

A estratégia V/f é o tipo de estratégia mais vulgarizada no comando de motores de indução. Esta versão da técnica, no entanto, apresenta ainda algumas insuficiências.

Para fazer face à carência de binário às baixas frequências, aparecem variações desta técnica, de modo a que se mantenha um fluxo com um valor próximo do nominal (figura 2.43).

Utilizando o método apresentado na imagem 2.43-a), são obtidas as curvas mostradas em 2.44.

Recorrendo ao método apresentado na imagem 2.43-b), são obtidas as curvas mostradas em 2.45.

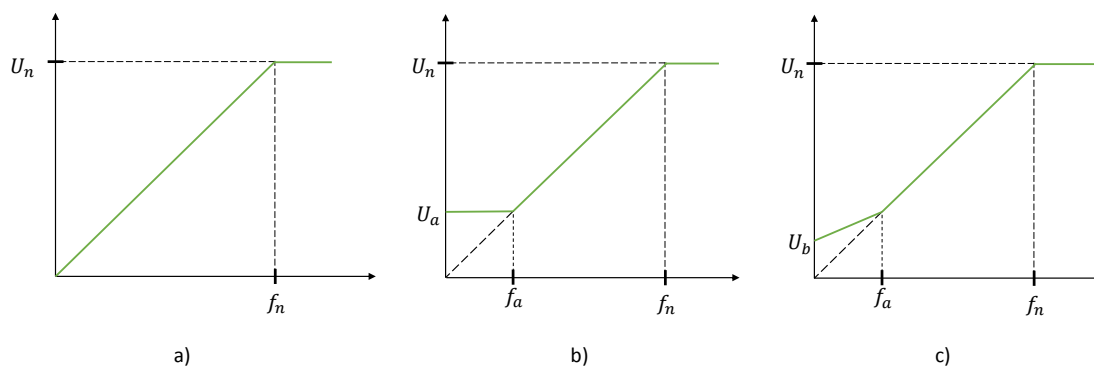


Figura 2.43: Representação da técnica V/f constante e técnicas derivadas.

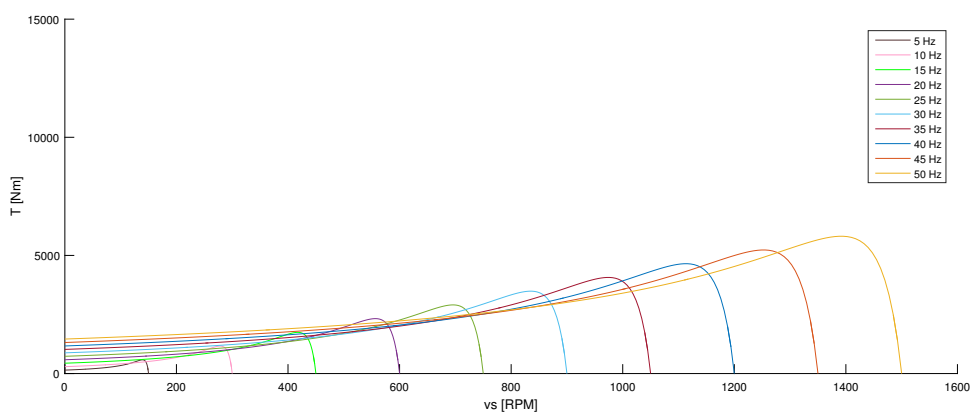


Figura 2.44: Curvas de binário em função da velocidade. Simulação realizada através da estratégia apresentada em 2.43-a).

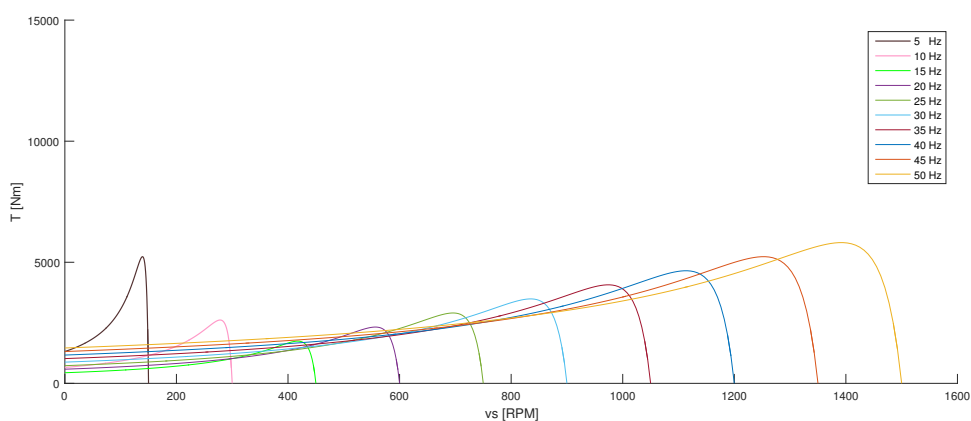


Figura 2.45: Curvas de binário em função da velocidade. Simulação realizada através da estratégia apresentada em 2.43-b).

2.6 Distorção Harmónica e Compatibilidade Eletromagnética

Na secção anterior, referiram-se os onduladores como elemento introdutor de conteúdo harmónico a jusante do inversor, isto é na máquina. Os retificadores, por sua vez, requerem especial atenção a este nível, na medida em que podem afetar, a rede a montante (na distribuição inclusive).

A circulação de correntes harmonicamente poluídas pode ter consequências a vários níveis (tão mais quanto maior a potência do variador). Estes problemas são enumerados infra [47]:

1. Radiointerferências (perturbação de sistemas de comunicações, telecomando, imagem, etc.);
2. Perturbações em equipamentos de instrumentação, aquisição de dados, informática, e até dispositivos de proteção;
3. Sobretensões na rede por ressonância;
4. Deformação da tensão durante as comutações;
5. Aumento do consumo de reativa.

Em 1 e 2 as consequências são nefastas para os restantes consumidores e equipamentos da rede, e para a vizinhança. ¹¹

O ponto 5 prejudica as condições de exploração da rede, podendo além disso, causar transtorno financeiro ao consumidor que a causa.

Em 4 a deformação da onda de tensão é causada pela condução simultânea de 2 dispositivos não lineares de *switching* durante o tempo de comutação.

Por outro lado as harmónicas podem representar um impacto económico considerável causando:

- Envelhecimento precoce do material;
- Sobrecargas e aumento das perdas na rede aumentando a potência necessária;
- Deformação da corrente podendo provocar disparos e paragem da produção.

A THD em Tensão (V_{THD}) caracteriza a deformação da onda de tensão. Um valor de V_{THD} inferior a 5% é considerado como normal, não se antevendo qualquer anomalia na instalação. Um valor de V_{THD} compreendido entre 5% e 8% revela uma poluição harmónica significativa, que pode provocar anomalias na instalação. Um valor de V_{THD} superior a 8% revela uma poluição harmónica considerável, sendo muito provável a ocorrência de anomalias na instalação.

¹¹A qualidade da energia é responsabilidade de todos os intervenientes da rede

A THD em corrente (A_{THD}) caracteriza a deformação de onda de corrente. Um valor de A_{THD} inferior a 10% é considerado normal numa instalação não se prevendo a ocorrência de anomalias elétricas. Um valor de A_{THD} compreendido entre 10 e 50% revela uma poluição harmónica significativa. Um valor de A_{THD} superior a 50% revela uma poluição harmónica considerável, podendo implicar anomalias na rede.

O teor harmónico das correntes alternadas desenvolvido pelos retificadores caracteriza-se por espectros de amplitude tipicamente decrescentes com a ordem das harmónicas.

As harmónicas de mais baixa ordem são as que mais transtorno provocam na rede. Com vista à mitigação deste problema, estão disponíveis várias soluções. Entre elas estão:

- Técnicas de cancelamento harmónico;
- Filtragem passiva;
- Filtragem ativa.

No projeto S2C, em que colaborei, aos distribuidores/instaladores é exigido o fornecimento da solução VEV com filtro *Electromagnetic compatibility* (EMC) e ferrites ou reactâncias DC (Para médias e grandes potências ($P_n > 22kW$)).

Adicionalmente deverão ainda existir medidas complementares, tais como [47]:

- Isolamento galvânico entre circuitos de sinal e potência;
- Ligações de massa;
- Equipotencializações;
- Blindagens.

Estas medidas integram um conjunto mais alargado de outras medidas, que devem ser tomadas tanto por fabricantes como por instaladores, por forma a garantir o cumprimento das diretivas de compatibilidade eletromagnética.

A compatibilidade eletromagnética (EMC) refere-se à capacidade do equipamento para funcionar satisfatoriamente no seu ambiente eletromagnético sem introduzir perturbações eletromagnéticas intoleráveis noutro equipamento presente no mesmo ambiente [64].

A Interferência Eletromagnética (EMI) pode ser introduzida no circuito elétrico das seguintes formas:

- Através de condutores de potência ou de dados/sinal;
- Radiada através de campo elétrico ou campo magnético de um circuito fonte até outro, o circuito recetor, que sofre a interferência.

Estas podem-se distinguir ainda quanto à frequência da interferência. Diz-se Interferência de Baixa Frequência (LF) na ordem dos 10kHz e Alta Frequência (HF) até aos 10kHz.

Na indústria as mais comuns de EMI são:

- Circuitos suscetíveis de produzir arco elétrico;
- Circuitos que produzem tensões não sinusoidais, emitindo campo elétrico;
- Circuitos que geram correntes não sinusoidais, emitindo campo magnético.

Nos variadores eletrónicos de velocidade, destacam-se duas zonas suscetíveis de gerar EMI:

- **A montante (lado do retificador)** - As harmónicas produzidas pelo retificador na gama de frequências dos $\approx 3\text{kHz}$, são injetadas, isto é, afetam a onda de tensão do lado da rede. Estas poderão causar perdas adicionais a montante e afetar outros equipamentos. A EMI radiada do retificador é de relativamente baixa frequência (baixo $\frac{di}{dt}$);
- **A jusante (lado do conversor)** - As frequências de *switching*, podem chegar às dezenas de kHz, podendo fazer chegar até ao motor harmónicas conduzidas através do cabo que liga o VEV ao motor (principal canal de transmissão). A EMI de elevada frequência radiada do cabo, deve-se ao elevado valor de $\frac{dV}{dt}$. A eficiência do motor também é comprometida (tão mais quanto pior a qualidade da corrente que lhe chega). Nos conversores, embora a altas frequências de *switching*, as perdas no motor sejam reduzidas, as perdas no cabo condutor aumentam. Também por isso, se deve ter em atenção o comprimento máximo do cabo, devendo o VEV ser instalado o mais próximo possível do motor.

É condição que, para que se proceda à implementação das medidas, os níveis de distorção harmónica se encontrem dentro dos limites exigidos por lei. No processo de adjudicação, parte-se do pressuposto que isto acontece.

METODOLOGIA

O objetivo da dissertação fixa-se na construção de quatro ferramentas: dois módulos referentes a Motores de Alto Rendimento (MAR), e dois módulos referentes à avaliação na aplicação de Variadores Eletrónicos de Velocidade (VEV). É pretendido que, para cada medida, sejam desenvolvidos um módulo detalhado (orientado a um cliente técnico), e um módulo simples (destinado a utilizador não técnico).

Na construção da ferramenta, é requisito que se tenha em conta que esta poderá ser utilizada por quadros com competências técnicas no contexto destes sistemas, por exemplo o Técnico Responsável de Exploração (TRE) da instalação, ou por outro lado, clientes com um perfil não técnico.

Em cada ferramenta, é pretendido que se faça a caracterização de um sistema eletromotriz, com o intuito de obter uma avaliação do potencial de retorno, quer a nível de poupança energética, quer a nível de economia financeira.

Com base nos pressupostos do utilizador (daqui em diante designado cliente), deve ser possível estimar com alguma precisão quais os benefícios pós intervenção. Com isto, deve ser apresentada uma proposta onde se descreve com algum detalhe o potencial de cada medida e onde o cliente selecionará as intervenções que porventura ache vantajosas.

Toma-se como estratégia cronológica, em primeira instância a construção dos módulos detalhados. De seguida, é efetuada uma reflexão e análise aos modelos, onde se considera a diminuição do número de campos de *input*, com o objetivo de simplificar a experiência de um utilizador não técnico, tornando-a também menos fastidiosa, com o mínimo de prejuízo na precisão da estimativa. Pretende-se portanto, manter sempre um compromisso entre simplicidade e eficácia/precisão.

Como o desenvolvimento de ambas as ferramentas apresentam traços comuns, opta-se por iniciar o desenvolvimento da ferramenta de MAR, sendo que partes deste módulo integrariam o modelo da ferramenta de VEV.

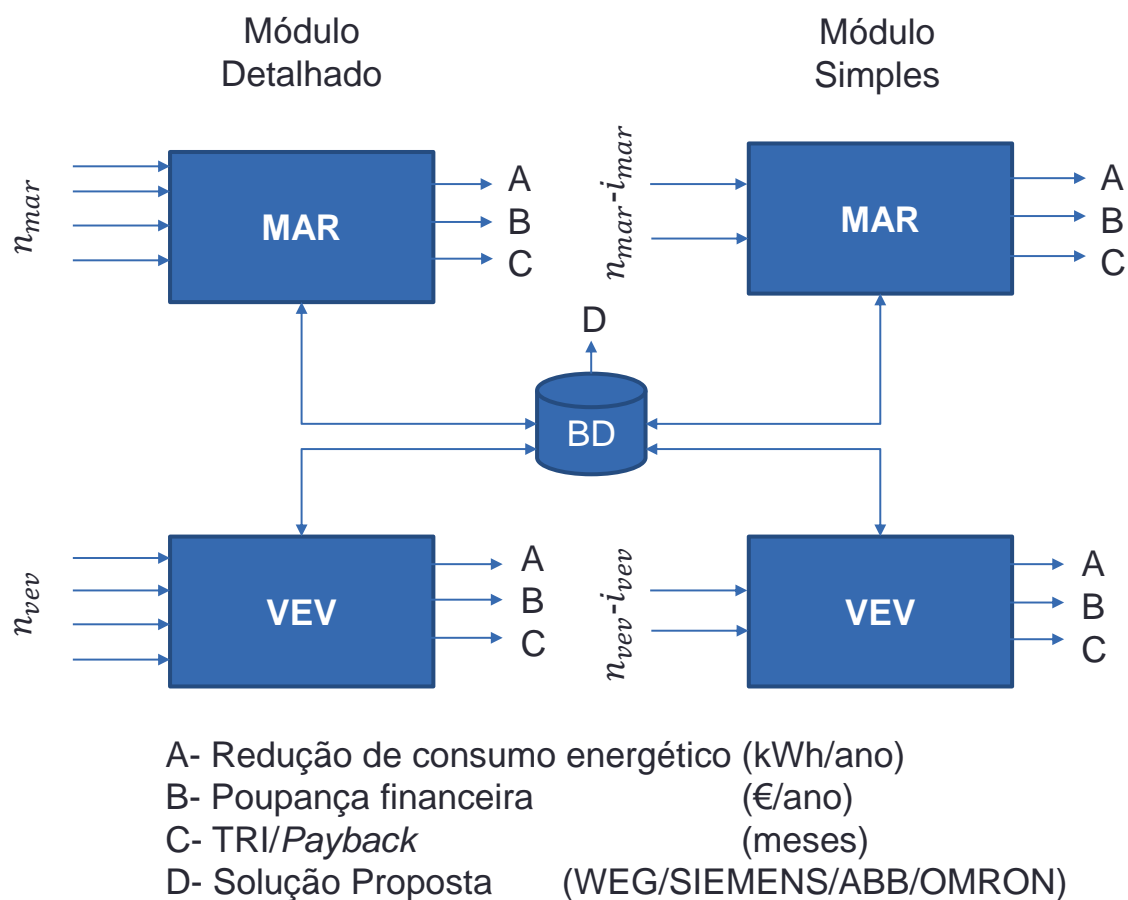


Figura 3.1: Representação esquemática da abordagem inicial no planeamento dos modelos *Input-Output*.

Como foi referido, de uma perspetiva metodológica todas as ferramentas apresentam um procedimento comum. Na figura 3.1 e 3.2, mostra-se os esquemas representativos da estratégia tomada.

Enquanto os módulos MAR incidem fundamentalmente na caracterização do motor presente na instalação do cliente, na variação eletrónica de velocidade torna-se necessário considerar uma caracterização mais a jusante, tendo em conta o tipo de aplicação de força-motriz, tal como da carga acionada.

Nos próximos capítulos pretende-se mostrar com maior pormenor as estratégias consideradas no desenvolvimento de cada modelo, assim como os métodos de cálculo, e estratégias empíricas consideradas e posteriormente aplicadas.

3.1 Motores de Alto Rendimento - Módulo Detalhado

Como foi já referido, o processo deve permitir que o cliente avalie a poupança anual que advém do seu investimento, assim como o TRI (tempo de retorno de investimento) na substituição de um motor de menor rendimento por outro de alta eficiência. Deve ainda

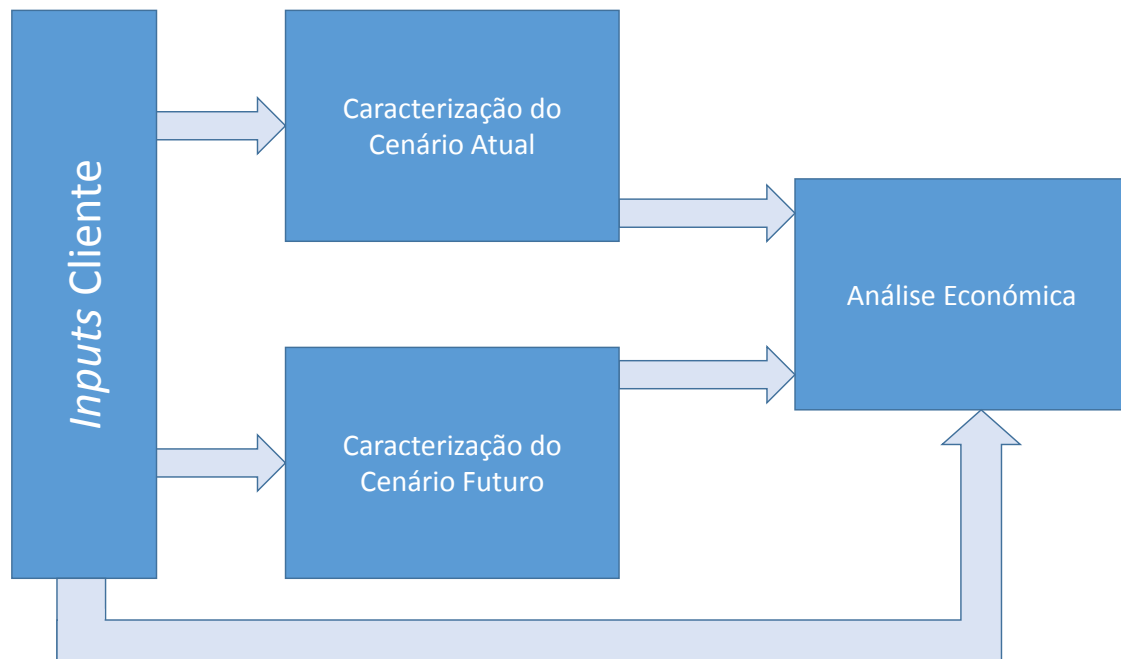


Figura 3.2: Representação esquemática do macro procedimento comum a todas as ferramentas.

ser dada ao cliente a possibilidade de optar por uma ou outra marca de fabricante (marca A, B ou C), sendo realçado no entanto, no final da simulação, qual o produto que lhe traria um TRI mais curto.

Considerando o conhecimento interno à empresa, é relativamente comum na indústria o cliente trabalhar maioritariamente com motores de um determinado fabricante, tendo preferência na substituição dos motores por motores desta marca.

Se efetivamente houver uma preferência por uma das marcas apresentadas, esse será o principal critério de seleção, mesmo que o motor não seja o que em termos de economias trará mais vantagem. Aquando da submissão de uma proposta com mais de um motor, a proposta de substituição motores, é apenas feita com produtos do mesmo fabricante, isto é, um cliente que submeta uma proposta com dez motores, pode escolher a marca, mas a proposta é feita considerando todos os motores dessa marca.

Nos módulos MAR, toma-se como estratégia de definição do sistema eletromotriz atual, a separação dos dados de entrada em dois tipo de grupos:

1. Caracterização do Motor;
2. Características de Operação.

Estes *inputs* alimentam os algoritmos de cálculo relativos à caracterização do cenário atual e ao cenário futuro.

3.1.1 Caracterização do Motor

O elemento de destaque e em que se inspira o desenvolvimento da estratégia de caracterização do motor, é a chapa de características. Assim, torna-se relativamente fácil para o cliente a introdução dos dados requeridos, sendo que estes estão presentes na chapa (Pela experiência absorvida, não é incomum na indústria observar - principalmente em motores expostos a ambientes adversos, ou no exterior - a degradação das condições da chapa, impossibilitando por vezes a sua legibilidade).

Cabe então, de entre os parâmetros disponíveis na chapa (figura 3.3), selecionar os estritamente necessários à sua caracterização, tendo em conta, não só os que permitem caracterizar o motor do ponto de vista energético (com vista ao cálculo consumos), mas também que possibilitem a seleção de uma máquina de alto rendimento, para substituição.

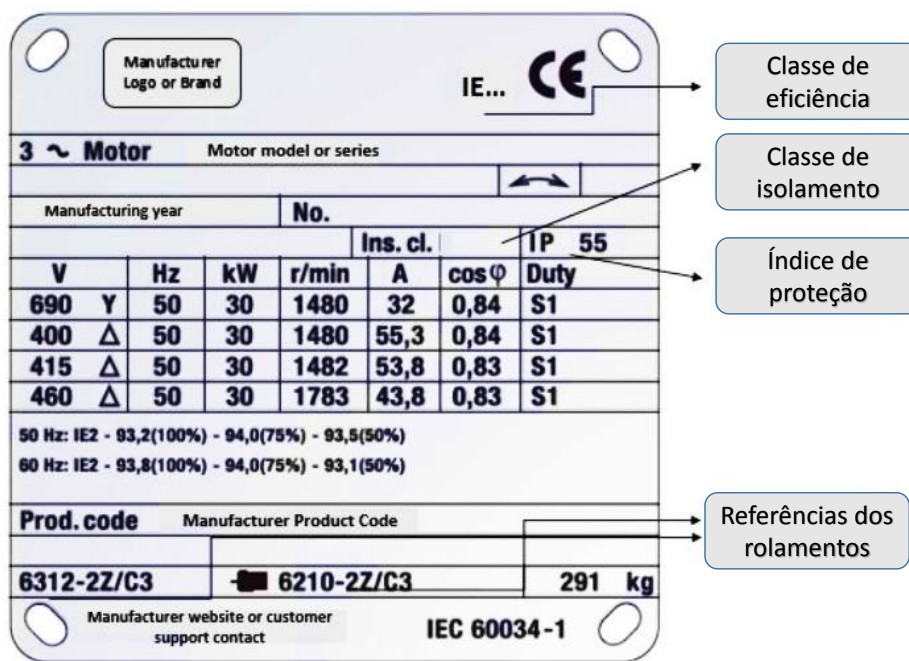


Figura 3.3: Exemplo de uma chapa de características e informação disponível.

Cada motor é caracterizado através de seis *inputs*:

- Referência/Descrição;¹
- Potência nominal;
- Classe de eficiência ;
- Número de polos;

¹ Possibilita em M&V que o auditor faça a rápida associação entre a informação do motor caracterizado, e o motor físico na instalação do cliente.

- Idade do motor;
- Número de vezes rebobinado.

Os *inputs* considerados acima, advêm da necessidade de calcular a potência elétrica absorvida. Esta pode ser obtida através de medições, já que,

$$P_{ele} = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_l \cdot \cos\varphi \quad (3.1)$$

Onde,

U_c - Tensão entre fases (V);

I_l - Corrente na linha (A).

A potência absorvida pode também ser calculada através da expressão,

$$P_{ele} = \frac{P_{nom} \cdot FC}{\eta_{motor}} \quad (3.2)$$

Onde,

P_{ele} - Potência elétrica absorvida (kW);

P_{nom} - Potência nominal (kW);

FC - Fator de carga;

η_{motor} - Eficiência do motor.

Daqui reconhecem-se dois valores presentes na chapa de características indispensáveis à caracterização do sistema, nomeadamente a potência nominal e o rendimento nominal. Do fator de carga falar-se-á mais a diante.

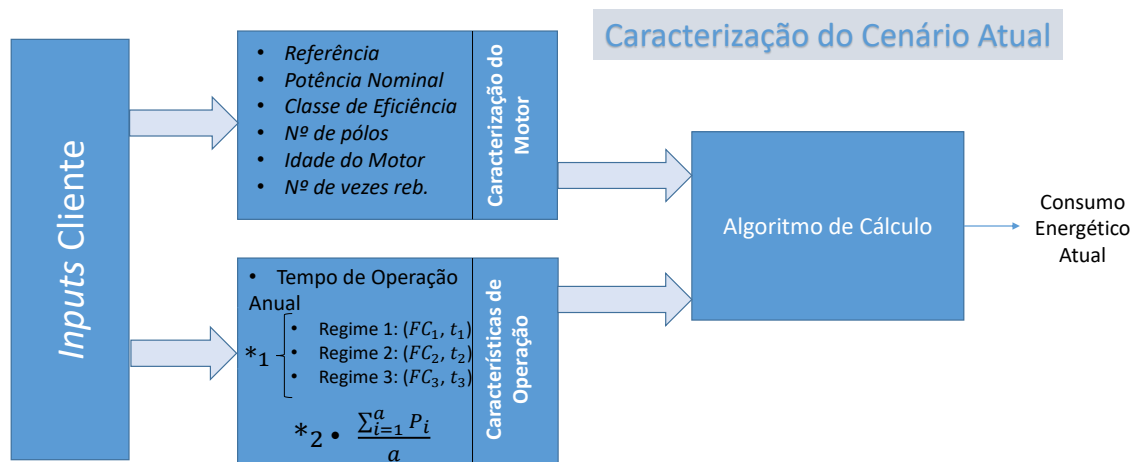


Figura 3.4: Esquema representativo da estratégia de caracterização do cenário atual. (O cliente escolhe entre duas alternativas para realizar a caracterização carga/tempo do motor: *1-Desagregação por regimes e *2- Cálculo da potência média através de medições)

Lembre-se mais uma vez, a necessidade de, como resultado de uma simulação, ser apresentada uma solução concreta: a recomendação de um novo motor de alto rendimento. Embora da chapa de características se tomem como imprescindíveis os valores de rendimento e potência nominal, para que se possua informação suficiente para a caracterização do motor a recomendar, torna-se necessário saber o número de polos do motor. Assim sendo, este *input* (ou a velocidade nominal), terá obrigatoriamente que integrar o modelo, aumentando o número de entradas do modelo (mesmo que *à priori* não seja imprescindível ao cálculo de consumos), como representado na figura 3.4.

Equacionou-se então uma alternativa. Com base nas fórmulas de cálculo [31] (ver equação 2.10), torna-se possível inferir o valor do rendimento do motor, sabendo a classe de eficiência e o número de polos do motor. Embora se adicione como entrada, a classe de eficiência, é possível inferir o rendimento, aumentando a informação recolhida, com o mesmo número de entradas.

3.1.2 Características de Operação

Na versão detalhada da ferramenta de MAR, admite-se a utilização por quadros técnicos. Admite-se também que o cliente possui um analisador de energia ou acesso a relatórios de auditoria anteriores. Assim, o cliente enveredará por uma das opções: a primeira inspira-se no método de medição direto, a segunda exige que seja feita uma caracterização de regimes de carga em função do tempo relativo em que o motor opera em cada um desses regimes.

No que às características de operação diz respeito, consideram-se como entrada do modelo,

- Horas de funcionamento anuais;
- Fator de carga em cada regime (FC_r , com $r \in \{1,2,3\}$);
- Percentagem de horas de funcionamento em cada regime (t_r , com $r \in \{1,2,3\}$).

É tomada também uma estratégia com base na desagregação de consumos. Isto é, para r regimes de carga, o utilizador definirá o número de horas, ou a percentagem de horas anuais em cada um destes regimes.

A definição deste diagrama de regimes é importante também devido à forma como se degrada a eficiência, à medida que se reduz o fator de carga. Em motores de eficiência *Premium*, esta degradação é ligeiramente menos acentuada, aumentando o potencial na troca de um motor sobre-dimensionado. É possível ter este aspeto em consideração, sem que se aumente a complexidade da ferramenta do lado do cliente.

A caracterização das condições de operação prendem-se com a necessidade de cálculo da potência absorvida em cada regime de carga. Para o regime r vem:

3.1. MOTORES DE ALTO RENDIMENTO - MÓDULO DETALHADO

Tabela 3.1: Considerações sobre a degradação do rendimento a 30% da carga e sobre como este varia tendo em conta a classe de eficiência IE (IE1, IE2, IE3, IE4) e a potência nominal (15, 45, 132 kW). Estudo realizado para motores da linha WEG W22, carcaça em ferro fundido, frequência nominal 50Hz, 4 polos.

Pn	Classe IE	FC=30%	FC=50%	FC=75%	FC=100%	$\Delta\eta_{0.3/1}$	$\Delta\eta_{0.5/1}$
15 kW	IE1	86.1	89	89.7	89.3	3.7 %	0.3%
	IE2	87	90.6	91	91	4.4 %	0.44%
	IE3	88.8	92.2	92.5	92.3	3.8 %	0.1%
	IE4	89	92.7	93.6	93.9	5.2 %	1.27%
45 kW	IE1	89.5	92.3	92.7	92.5	3.24 %	0.21%
	IE2	90.5	92.7	93	93.1	2.8 %	0.43%
	IE3	91.5	93.7	94.1	94.4	3.07 %	0.74%
	IE4	91.5	94.2	95	95.4	4.08 %	1.26%
132 kW	IE1	92	93.7	94.4	94.3	2.44 %	0.64%
	IE2	90.7	94.3	94.9	94.8	4.32 %	0.73%
	IE3	93.5	95.1	95.7	95.8	2.4 %	0.73%
	IE4	94	96.1	96.7	96.9	3.01 %	0.83%

$$P_{ele_r} = \frac{P_{nom} \cdot FC_r}{\eta_{motor}} \quad (3.3)$$

Também é possível notar que, a eficiência dos motores, sofre relativamente pouca alteração a 50% da carga, podendo-se dizer que é aproximadamente constante (tabela 3.1).

Caso não se considerasse o fator de carga como entrada no modelo, os valores para o tempo de retorno de investimento afastar-se-iam da realidade e por excesso.

Se o cliente puder proceder à monitorização do diagrama de carga do motor, é-lhe pedido que forneça o valor da potência média consumida ao longo de um dia. Tendo em conta que o analisador recolhe a amostras, ao longo de um dia de operação, vem:

$$P_{med} = \frac{\sum_{i=1}^a P_i}{a} \quad (3.4)$$

Através do valor da potência média, será depois possível também calcular o fator de carga do motor. Fazendo,

$$FC = \frac{P_{ele} \cdot \eta_{motor}}{P_{nom}} \quad (3.5)$$

Por outro lado, e caso o cliente não possua meios de medição, torna-se necessário que este caracterize o diagrama de carga em três regimes.

O número de regimes a considerar foi discutido em reunião e pretende cumprir o compromisso entre simplicidade e precisão.

3.1.3 Caraterização do Cenário Atual

Características de operação

Para que se calcule a energia consumida anualmente, e para que se respeite a estratégia de desagregação de consumos, sabendo o tempo em que o sistema trabalha em cada regime, o cálculo é efetuado de forma ponderada. Veja-se a figura 3.5, onde é possível visualizar a estimativa da diferença da energia consumida antes e depois da aplicação da medida, para r regimes com $r \in \{1, 2, 3, \dots, a\} : 1 < r < a$.

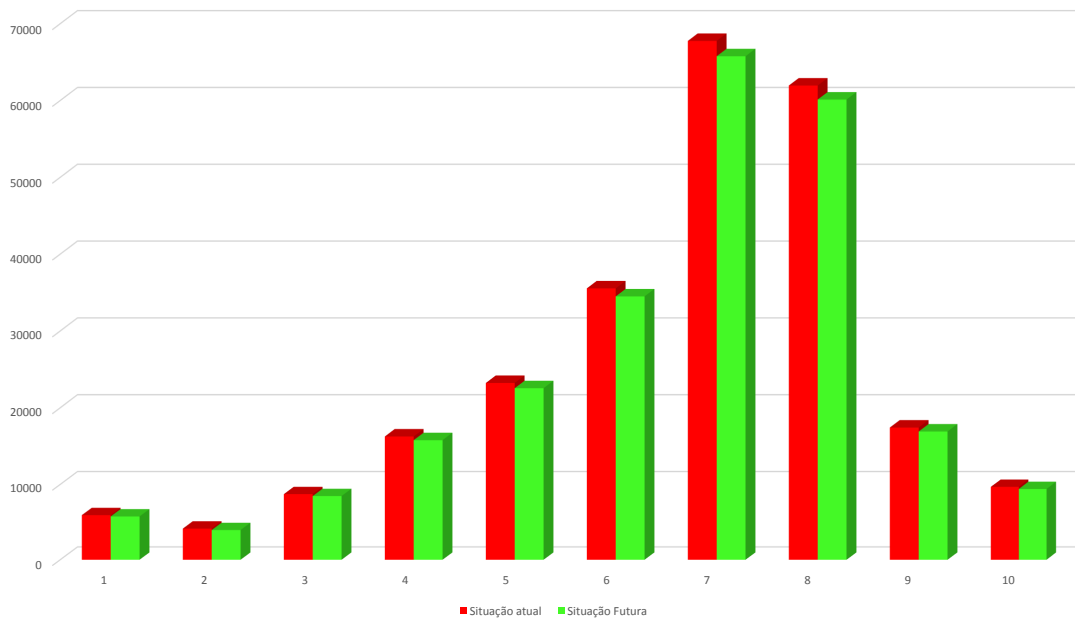


Figura 3.5: Exemplo da representação gráfica dos consumos atuais e futuros estimados, com base na definição dos regimes de carga para $n=10$ (Gráfico retirado de uma versão anterior da ferramenta.)

Como o valor da energia consumida anualmente depende do número de horas anuais de funcionamento devendo este ser um valor de entrada.

Desta forma, calcula-se a energia consumida anualmente em cada regime. Para o regime r vem,

$$E_{cons_r} = Pe_{le_r} \cdot t_r \quad (3.6)$$

sendo,

Pe_{le_r} , a potência consumida no regime r (para um dado fator de carga no regime r) [kW];

t_r , o tempo de operação do sistema no regime r [horas/ano];

No contexto, e para $r=1, 2$ e 3 vem,

$$\text{Regime 1: } E_{cons1} = Pe_{le1} \cdot \frac{\text{Horas}_{regime1}}{\text{ano}};$$

$$\begin{aligned} \text{Regime 2: } E_{cons2} &= P_{ele2} \cdot \frac{\text{Horas}_{regime2}}{\text{ano}}; \\ \text{Regime 3: } E_{cons3} &= P_{ele3} \cdot \frac{\text{Horas}_{regime3}}{\text{ano}}. \end{aligned}$$

A energia total consumida por ano, na situação atual, vem dada pela soma da energia consumida nos três regimes, isto é,

$$E_{total} = \sum_{r=1}^3 E_{cons_r} \quad (3.7)$$

onde,

E_{total} - Energia consumida anualmente, no cenário atual (kWh);

E_{cons_r} - Energia consumida anualmente, no regime r , no cenário atual (kWh).

3.1.4 Caracterização do Cenário Futuro

A caracterização da situação futura, representada na figura 3.6, tem como objetivo o cálculo da energia total consumida anualmente com o novo motor.

Como já foi referido, consideram-se três marcas de fabricantes, sendo objeto de cálculo deste módulo, na verdade, três cenários futuros.

Para que se proceda à seleção de um motor, que irá integrar a caracterização do cenário futuro e possivelmente a proposta ao cliente, são considerados os seguintes *inputs*:

- Potência nominal;
- Número de polos;
- Classe de eficiência².

A potência considerada para o novo motor é a mesma do que o motor a substituir, ou seja, não se considera a hipótese de *downsizing*. Assim, o motor proposto terá características semelhantes ao anterior, no que aos três dados de *input* referidos acima, que constituem os critérios de seleção.

Através da base de dados, construídas em colaboração com a *Unidade de Procurement*, que contem as características de todos os motores IE3, de 2, 4, 6 e 8 polos, e de potências nominais de 0,12 kW até 375 kW, e de restantes características referidas na secção 2.1.6, seleciona-se o motor de alto rendimento para substituição, como esquematizado na figura 3.7.

A partir daqui, repetir-se-á o processo análogo à caracterização do motor atual. A informação facultada pelo cliente é utilizada para caracterizar a situação futura.

²Todos os motores considerados para substituição são IE3.

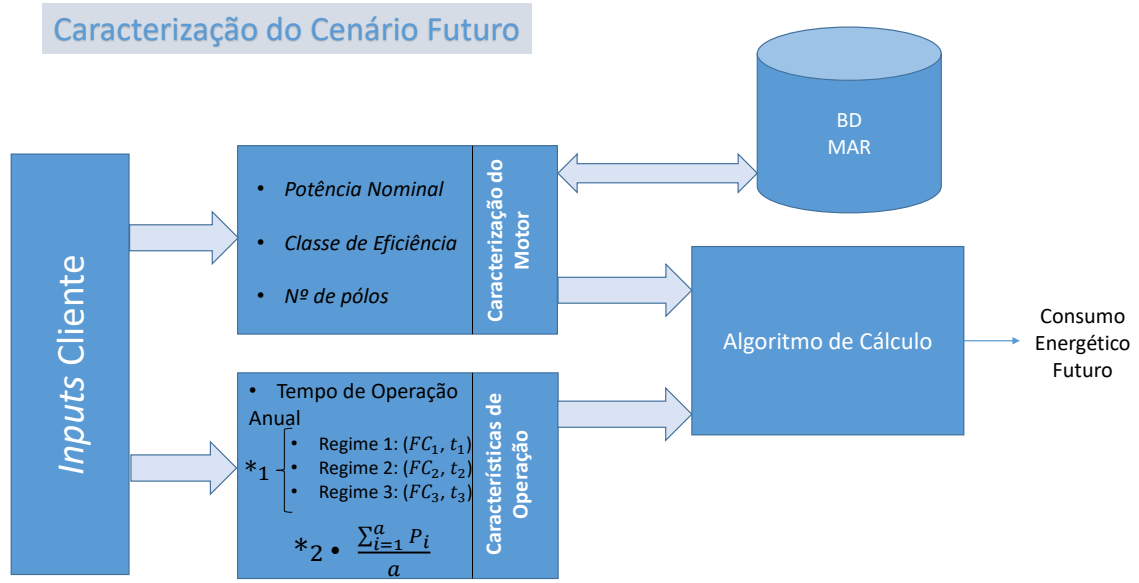


Figura 3.6: Exemplo da representação gráfica dos consumos atuais e futuros estimados, com base na definição dos regimes de carga para $n=10$ (Gráfico retirado de uma versão anterior da ferramenta.)

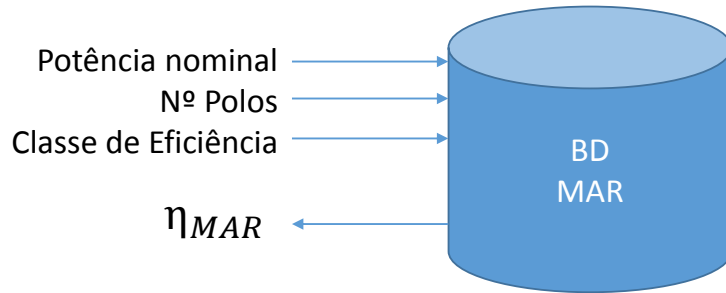


Figura 3.7: Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da energia consumida anualmente pelo sistema.

A potência consumida no cenário futuro vem, para cada regime r ,

$$P_{ele_r} = \frac{P_{nom} \cdot FC_r}{\eta_{MAR}} \quad (3.8)$$

sendo,

P_{nom} - Potência nominal do motor;

FC_r - Fator de carga no regime r ;

η_{MAR} - Eficiência nominal do motor de alto rendimento, declarada pelo fabricante.

A energia consumida anualmente no cenário futuro em cada regime vem dada por,

$$E_{cons_r} = P_{ele_r} \cdot t_r \quad (3.9)$$

sendo,

E_{cons_r} - Energia consumida anualmente no regime r ;

P_{ele_r} - Potência elétrica considerada, no regime r ;

t_r - Tempo de operação anual, no regime r .

3.2 Motores de Alto Rendimento - Módulo Simples

A versão simples da ferramenta de apoio à decisão em eficiência energética na avaliação da viabilidade de investimento na substituição por motores de eficiência *premium*, inspira-se no cliente alvo não técnico, e deve permitir que este efetue uma simulação de forma mais rápida e simples.

No Módulo Simples mantém-se o processo de caracterização do módulo de MAR Detalhado. Tirando partido dos dados fornecidos pelo cliente procede-se à,

- Caracterização do Motor;
- Características de Operação.

Neste momento, a estratégia passa por simplificar os processos de caracterização do motor e das condições de operação. Esta simplificação pretende diminuir o número de dados de entrada pedidos ao cliente, com consequente simplificação do modelo.

Nesta fase, é equacionada a realização de uma análise de sensibilidade ao modelo, por forma a aferir quais os *inputs* que maior influência teriam nos *outputs*. Estes desenvolvimentos serão contemplados mais à frente no presente capítulo e o resultado no fim do capítulo 4.

Após reflexão e análise do modelo, toma-se como critério, a consideração da exclusão de *inputs*, cujo funcionamento do modelo não depende de forma imprescindível.

3.2.1 Caracterização do Motor

Considerando a estratégia de caracterização do cenário atual e futuro, chega-se à conclusão de que existem três *inputs* não passíveis de serem retirados do modelo. A potência nominal, e o números de polos permitem selecionar, com recurso à base de dados, o novo produto (sendo dados de entrada que não podem ser excluídos).

O rendimento do motor atual é essencial ao cálculo na equação 3.2, permitindo caracterizar o cenário atual.

Tomam-se então, como prescindíveis à caracterização do cenário atual, a idade do motor e o número de rebobinagens, sendo estes campos de entrada que conferem refinamento ao modelo, mais precisamente ao cálculo da eficiência real do motor atual, não sendo, no entanto, essenciais ao cálculo.

Os campos de *input* na versão simples da ferramenta MAR são:

- Descrição/referência;
- Potência nominal;
- Classe de eficiência;
- Número de polos.

3.2.2 Características de Operação

Na definição das características de operação em MAR simples, a estratégia assenta na redução dos regimes de carga considerados. Agora é pedido ao cliente que este faculte o fator de carga médio a que o motor opera ³. Desta modo, torna-se mais ou menos “familiar” o preenchimento deste campo. Exclui-se também desta forma a necessidade de desagregação em frações de tempos de consumo.

3.2.3 Caraterização do Cenário Atual

À semelhança do que se fez para o módulo detalhado, representa-se a estratégia de caracterização através do esquema presente na imagem 3.8.

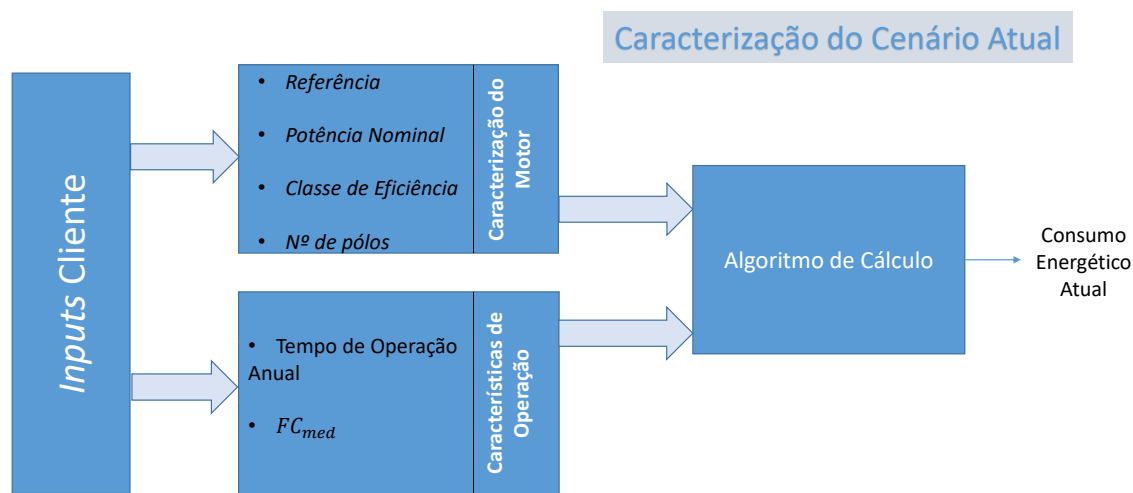


Figura 3.8: Representação esquemática relativa à caracterização do cenário atual, para efeitos de cálculo da energia consumida anualmente pelo sistema.

É mantida a lógica interna que considera a degradação do rendimento para baixos fatores de carga.

³À semelhança do que era pedido nas fichas de candidatura de PPEC's anteriores, onde se apresentavam três caixas tipo *check mark*, onde o cliente optava entre 25%, 50%, 75% ou 100%

O cálculo da potência consumida vem dada por:

$$P_{med} = \frac{P_{nom} \cdot FC_{med}}{\eta_{motor}} \quad (3.10)$$

A energia consumida anualmente vem dada por:

$$E_{cons} = P_{med} \cdot t_{op} \quad (3.11)$$

onde,

E_{cons} - Energia consumida anualmente, no cenário atual (kWh);

P_{med} - Potência média absorvida ao longo de um dia (kW);

t_{op} - Tempo de operação anual do sistema (h).

3.2.4 Caracterização do Cenário Futuro

A caracterização do cenário futuro mantém a estratégia seguida no módulo detalhado. Agora tal como na caracterização do cenário atual, sem desagregação de consumos com relação ao fator de carga e tempos de operação.

A imagem 3.9 mostra esquematicamente a metodologia para a implementação da caracterização do cenário futuro em MAR Simples.

A estratégia de seleção de um novo motor, com recurso à base de dados com as características de equipamentos, mantêm-se tal como ilustrado na figura 3.7, como se procede na versão detalhada.

3.3 Variadores Eletrónicos de Velocidade - Módulo Detalhado

Nesta secção pretende-se mostrar qual a estratégia metodológica seguida, com vista à construção do modelo para implementação da versão detalhada da ferramenta de variadores eletrónicos de velocidade.

Como já foi anteriormente referido, parte do modelo da ferramenta de MAR é integrado na ferramenta de VEV, nomeadamente na estratégia de caracterização do motor e características de operação.

No entanto, quando se pretende aferir acerca da viabilidade da implementação de variação eletrónica de velocidade, há que considerar a caracterização do sistema a jusante do motor.

Esta caracterização incide no tipo de aplicação acionada, no tipo de carga (com que essa aplicação está diretamente relacionada) e o método de controlo já existentes no sistema.

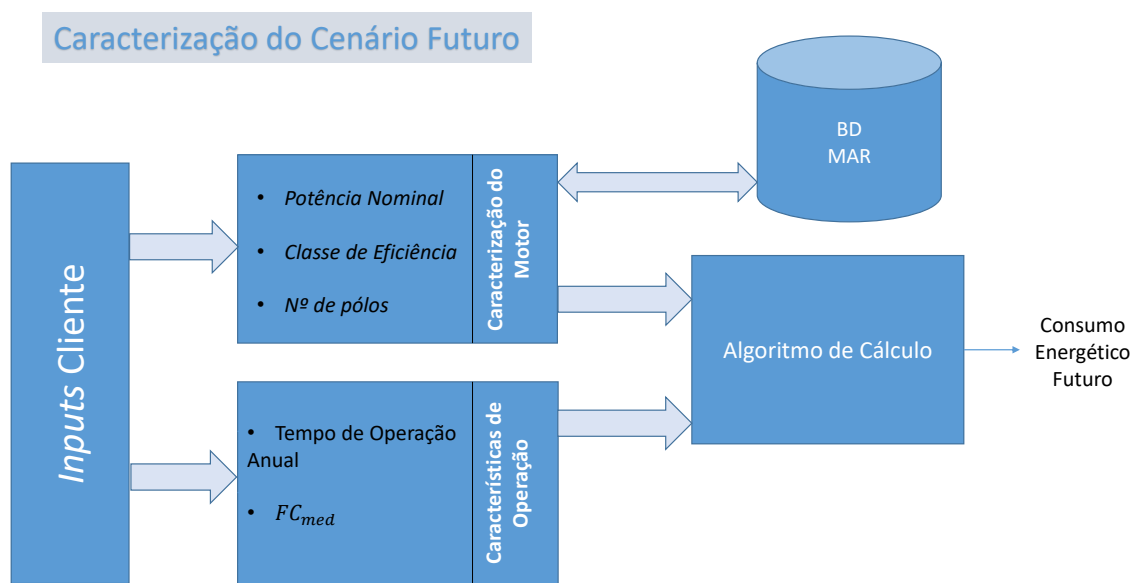


Figura 3.9: Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.

Tendo isto em conta, mantém-se a macro estratégia metodológica levada até então, no que diz respeito à caracterização dos cenários atual e futuro.

3.3.1 Caracterização do Motor

Para a caracterização do motor parte-se da metodologia apresentada na secção 3.2.1.

Repare-se que neste caso, o resultado dos valores de energia consumidos, e consequentemente dos benefícios económicos, dependem fortemente da caracterização do sistema a jusante do motor e da troca ou implementação do método de controlo, não se tornando importante fazer uma caracterização tão detalhada do motor já que este se manterá no sistema. Assim os dados de entrada considerados em 3.1.1, relativos à idade do motor e número de rebobinagens não influenciariam decisivamente o resultado pós intervenção, já que não se realiza a troca do motor.

Os campos de *input* considerados são:

- Descrição ou referência;
- Potência nominal;
- Classe de eficiência;
- Número de polos.

Os dois últimos *inputs* dão ainda a possibilidade de se incluir como sugestão ao cliente, a proposta da substituição do motor.

3.3.2 Características de Operação

A definição das características de operação, toma grande importância no contexto da avaliação do potencial energético e económico da implementação de variação eletrónica de velocidade. A dinâmica interna do modelo possui extrema sensibilidade com a variação destes parâmetros de entrada (nomeadamente na presença de cargas de binário quadrático).

Mais uma vez, tira-se partido de uma estratégia de desagregação de consumos, com definição de regimes de carga⁴ e tempos de operação.

Tal como no desenvolvimento da ferramenta MAR Detalhado, o número de regimes é alvo de discussão. Devido à sensibilidade do modelo face a estes dados de entrada, acordou-se a desagregação destes perfis em cinco regimes.

Mantém-se a estratégia de cálculo da degradação do rendimento com base no fator de carga do motor.

Os *inputs* que integram a caracterização da operação do sistema são:

- Horas de funcionamento anuais;
- Tempo de operação em cada regime (t_r , com $r \in [1; 5]$);
- Fator de carga (e/ou caudal) em cada regime (FC_r ou Q_r , com $r \in [1; 5]$).

3.3.3 Caracterização da Carga/Aplicação

Não é possível avaliar a viabilidade de implementação de velocidade sem que se proceda à caracterização do sistema a jusante do motor, sendo que diferentes aplicações beneficiam, de forma diferente, da implementação desta técnica. Isto acontece, devido às diferentes características de cada tipo de carga e devido à maneira como varia a potência necessária ao seu acionamento com a velocidade de rotação do motor.

O tipo de carga, como se viu na secção 2.4, está intimamente relacionado com o tipo de aplicação acionada. Posto isto, a estratégia metodológica tomada, é considerar como dados de entrada do modelo, o tipo de aplicação. Posteriormente, através do tipo de aplicação infere-se o tipo de carga.

Recorde-se que, o objetivo do modelo na caracterização de cenários é obter um valor para a energia consumida pelo sistema. Como os benefícios considerados no modelo provêm principalmente da substituição de um método de controlo menos eficiente, pela variação eletrónica de velocidade, torna-se necessário saber que métodos de controlo estão implementados no sistema, em contexto de cenário atual.

Parte-se do princípio de que o sistema atual não possui VEV.

⁴Em aplicações de bombagem e ventilação são considerados regimes de caudal e de carga.

Os *inputs* que permitem fazer a caracterização da carga acionada são:

- Tipo de aplicação;
- Método de controlo existente.

3.3.4 Caraterização do Cenário Atual

Tanto o processo de caracterização do motor como de definição das características de operação, fazem-se de forma muito semelhante ao que acontece na ferramenta MAR Detalhado e portanto não serão aqui alvo de grande escrutínio. No entanto, recorde-se mais uma vez a importância dos dados que caracterizam os regimes de operação do sistema, já que neste tipo de medida, a viabilidade do investimento depende fortemente da variabilidade destes regimes e dos valores de carga impostos pelos processos a acionar. A estratégia a tomar encontra-se esquematizada na figura 3.10.

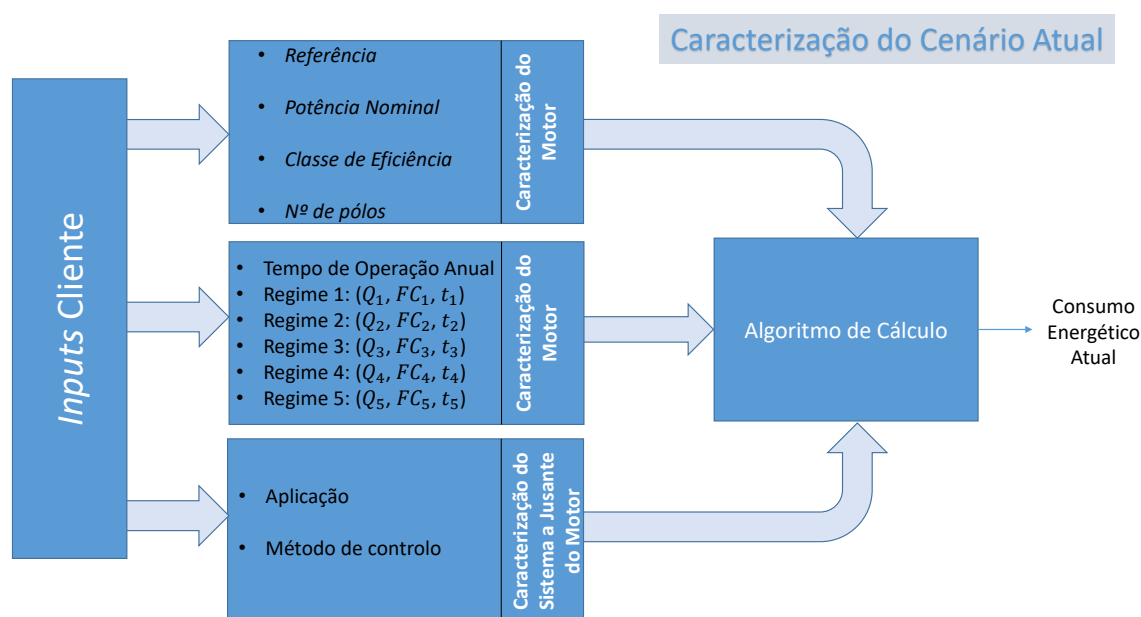


Figura 3.10: Representação esquemática relativa à caracterização do cenário atual, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.

Através dos dados de *input* do cliente relativos à aplicação, é possível inferir que tipo de carga se aciona.

Na plataforma, é facultada uma lista tipo *drop-down*, onde tem acesso às aplicações mais comuns na indústria (excluem-se aplicações de ar comprimido). Abaixo mostram-se as aplicações disponibilizadas, organizadas por tipo de carga:

1. Binário Quadrático

- Bomba centrífuga;
- Exaustor centrífugo;

- c) Ventilador centrífugo;
- d) Soprador Centrífugo (*Blower*) ;
- e) Centrífugas.

2. Binário Linear

- a) Bomba de deslocamento positivo;
- b) Misturadora.

3. Binário Constante

- a) Elevador;
- b) Prensa Mecânica;
- c) Prensa Rotativa;
- d) Esteira Transportadora;
- e) Máquina de corte;
- f) Extrusora;
- g) Trituradora;
- h) Guindaste;
- i) Amassadora.

Incontornavelmente, foram concentrados mais esforços no desenvolvimento do modelo em relação às cargas de ventilação e bombagem. Este tipo de aplicações, para além de estar fortemente presente na indústria em geral e apresentarem uma maior simplicidade de implementação a nível técnico, são aplicações cujo benefício económico direto proveniente da aplicação de variações eletrónica de velocidade se destaca fortemente das restantes, apresentando potencial de economia substancialmente superior.

Como observado na secção 2.4.5, na grande maioria das restantes aplicações de binário e potência constante o benefício é em grande parte, de forma indireta, proveniente de alterações a nível de controlo de processo (da alteração da velocidade dos acionamentos), seria necessário particularizar cada aplicação, exigindo assim um estudo de cada caso mais aprofundado, além disto, está sempre limitada aos processos produtivos. Assim para cada aplicação, tira-se partido de valores conhecidos de redução de consumo médios obtidos com o acumular de edições anteriores de PPEC. Estes valores são mostrados na secção 2.4 e validados como se poderá ler na secção 3.6.

Na secção 2.4.5 observou-se também que, por exemplo, para variação eletrónica de velocidade em aplicações de moagem, bobinagem ou transporte, parte considerável do benefício chega pela otimização a nível de processos, pelo aumento da produtividade e eficácia de processo e qualidade do produto final.

Os valores médios fixados relativos aos ganhos diretos, por aplicação são:

- Aplicações de binário linear, 20%;
- Aplicações de binário constante, 15%.
- Aplicações de potência constante, 5%. ⁵

Relativamente às aplicações de ventilação e bombagem, o cálculo de energia consumida em cada regime pode ser obtido como função do caudal em cada regime e do tempo de operação. No entanto, em diversa bibliografia e em ferramentas no contexto da caracterização deste tipo de sistemas, é usual assumir para este efeito, que o caudal nominal do sistema é debitado com o motor trabalhando à potência nominal. Na realidade, como visto na secção 2.4.5, os sistemas na indústria encontram-se fortemente sobre-dimensionados. Assim, na realidade um motor que trabalha, debitando o caudal nominal do sistema, não trabalha à sua potência mecânica nominal. Desta forma torna-se necessário que o cliente forneça o fator de carga a que a aplicação trabalha em cada regime.

Neste sentido, o cálculo da potência absorvida em cada regime de carga é feito como na equação 3.3. A energia total consumida anualmente vem dada pela soma da energia consumida em cada regime e pode ser obtida tal como indicado na equação 3.7.

3.3.5 Caracterização do Cenário Futuro

Na caracterização do cenário futuro, pretende-se calcular a energia consumida pelo sistema aquando a aplicação de variação eletrónica de velocidade, partindo dos pressupostos apresentados na imagem 3.11.

No caso da bombagem e ventilação, aborda-se o problema através dos regimes indicados pelo cliente em características de operação, calculando qual a redução da potência absorvida em cada regime e qual a potência necessária para que se debite o mesmo caudal, mas agora por ação do VEV. Repare-se que, no caso destas aplicações não se consideram alterações às características de operação dos regimes de funcionamento, isto é, admite-se que os caudais necessários ao funcionamento da aplicação se mantêm, advindo os ganhos apenas da substituição do método de controlo de caudal existente, por uma técnica mais eficiente, no contexto, um VEV.

A informação recolhida referente às características de operação é cruzada com as curvas típicas correspondentes a cada aplicação.

⁵Não incluído no modelo, devido ao baixo potencial de poupança energética.

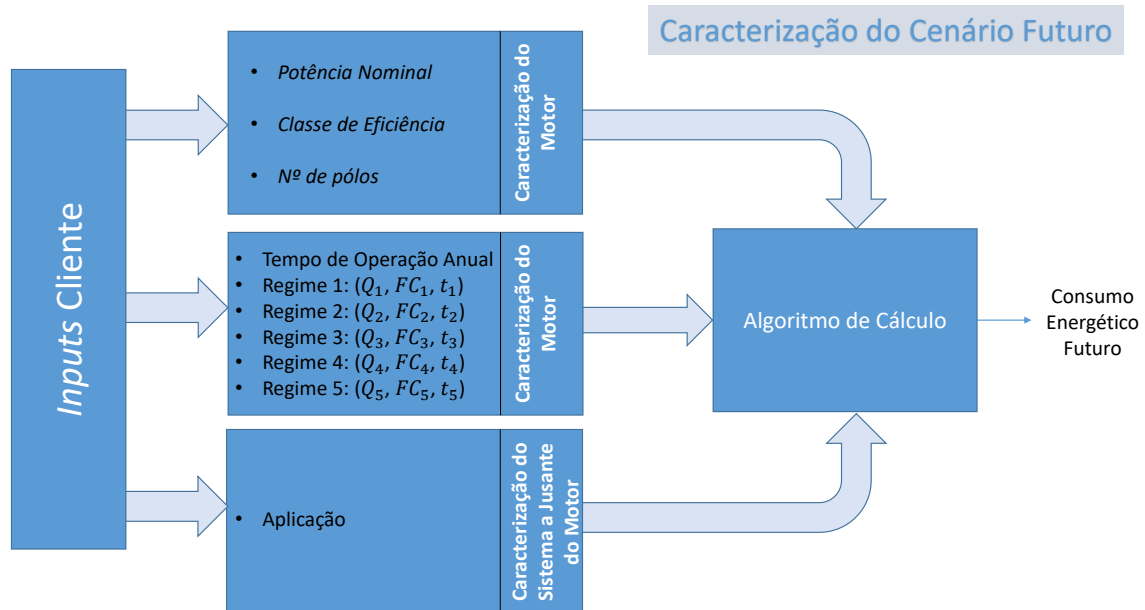


Figura 3.11: Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.

Mais uma vez, tem-se em conta que, ao débito do caudal nominal, não corresponde potência nominal do motor. Desta forma, trabalhando com o caudal nominal considera-se:

$$P_{absorvida} = \frac{P_{Qnom}}{\eta_{motor} \cdot \eta_{vev}} \quad (3.12)$$

Sabendo a que fator de carga se trabalha em cada regime é possível calcular a potência elétrica absorvida em cada regime. Através da percentagem do caudal nominal em cada regime.

Sabendo a percentagem de caudal necessário em cada regime, infere-se a potência necessária para que a bomba ou o ventilador continue a debitar o mesmo caudal, agora controlada por VEV.

A potência em cada regime de carga, isto é para cada caudal é calculado através das curvas típicas para cada aplicação.

As perdas no VEV e no motor estão já contempladas nas curvas.⁶

Calculada a percentagem da potência relativa à potência de caudal nominal, que assegura o débito do mesmo volume que na situação atual, chega-se à energia consumida em cada regime.

⁶Considera-se a eficiência média de um VEV cerca de 97%

A energia consumida pelo sistema vem então dada pela soma das energias calculadas em cada regime.

$$E_{fut} = \sum_{r=1}^5 P_{vev_r} \cdot t_r \quad (3.13)$$

onde,

E_{fut} - Energia consumida após a aplicação da medida (kWh);

P_{vev_r} - Potência absorvida em cada regime r de operação (kW);

t_r - Tempo de operação no regime r .

3.4 Variadores Eletrónicos de Velocidade - Módulo Simples

Na versão simples da ferramenta de VEV, toma-se como principal objetivo a simplificação da ferramenta detalhada. De facto, observando algumas candidaturas por parte de clientes de PPEC's de anos transatos, é possível concluir que a caracterização de um sistema neste contexto, se pode tornar demasiado complicado para um cliente sem competências técnicas.

Observando as figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, onde se vêem excertos de candidaturas PPEC, pertencentes à secção a preencher "Características da instalação elétrica", torna-se evidente a diferença no preenchimento. Se se atentar ao cargo da pessoa responsável pela candidatura, perceber-se-á, a dificuldade que uma pessoa não técnica tem no preenchimento da candidatura, nomeadamente no campo referente aos regimes de carga.

Características da instalação eléctrica

Aplic. do motor				
Bomba <input checked="" type="checkbox"/>	Compressor ar <input type="checkbox"/>	Compressor frio <input type="checkbox"/>	Ventilador <input type="checkbox"/>	Máq. de extrusão <input type="checkbox"/>
Máq. de centrifugar <input type="checkbox"/>	Máq. de serração de madeira <input type="checkbox"/>	Máq. de corte de pedra <input type="checkbox"/>	Outro <input type="checkbox"/>	
Potência (Kw) <input type="text" value="7.5"/>	Nº de horas de funcionamento <input type="text" value="5432"/> (horas/ano)			

Regime de carga vs horário funcionamento (Indicar nº de horas associada a cada regime de carga)

<input checked="" type="checkbox"/> 100% (horas/ano)	<input type="checkbox"/> 75% (horas/ano)
<input type="checkbox"/> 50% (horas/ano)	<input type="checkbox"/> 25% (horas/ano)

Figura 3.12: Candidatura PPEC submetida em edições transatas, através do diretor de serviços.

Assim, de forma a simplificar o processo de construção de regimes, seleccionam-se, através de curvas típicas de carga em sistemas de bombagem e ventilação, dispensando ao cliente (não técnico) desta tarefa, melhorando assim a sua experiência como utilizador.

Toma-se como estratégia adicional de simplificação da ferramenta, a exclusão de parâmetros de entrada. Tendo em conta os dados observados na secção 2.2.2, assume-se para efeitos de simulação que o sistema é acionado por um motor de quatro polos, de classe de eficiência IE2, visto que é o motor mais comum na indústria. Desta forma, eliminam-se

Características da instalação elétrica	
Aplic. do motor	Força motriz no misturador / amassador de argila
Bomba	Compressor ar
Máq. de centrífuga	Compressor frio
Potência (Kw)	Ventilador
37	Máq. de extrusão
	Máq. de serração de madeira
	Máq. de corte de pedra
	Outro X
Nº de horas de funcionamento	3120 (horas/ano)
(de momento 12h a partir na ponta machine)	
Regime de carga vs horário funcionamento (indicar nº de horas associada a cada regime de carga)	
60/100% (horas/ano)	20/75% (horas/ano)
15/50% (horas/ano)	5/25% (horas/ano)

Figura 3.13: Candidatura PPEC submetida em edições transatas, através do responsável de manutenção de sistemas.

Características da instalação elétrica	
Aplic. do motor	
Bomba	Compressor ar
Máq. de centrífuga	Compressor frio
Potência (Kw)	Ventilador X
37	Máq. de extrusão
	Máq. de serração de madeira
	Máq. de corte de pedra
	Outro
Nº de horas de funcionamento	2080 (horas/ano)
Regime de carga vs horário funcionamento (indicar nº de horas associada a cada regime de carga)	
2080 100% (horas/ano)	0 75% (horas/ano)
0 50% (horas/ano)	0 25% (horas/ano)

Figura 3.14: Candidatura PPEC submetida em edições transatas, através do Eng. Eletrotécnico Responsável

Características da instalação elétrica	
Aplic. do motor	
Bomba	Compressor ar
Máq. de centrífuga	Compressor frio
Potência (Kw)	Ventilador
7,5	Máq. de extrusão
	Máq. de serração de madeira
	Máq. de corte de pedra
	Outro MOTOR DE ALIMENTAÇÃO
Nº de horas de funcionamento	5472 (horas/ano)
Regime de carga vs horário funcionamento (indicar nº de horas associada a cada regime de carga)	
X 100% (horas/ano)	75% (horas/ano)
50% (horas/ano)	25% (horas/ano)

Figura 3.15: Candidatura PPEC submetida em edições transatas, pelo Diretor de Serviços da empresa.

os *inputs* referentes à classe de eficiência do motor e ao número de polos.

3.4.1 Caracterização do Motor

A caracterização do motor é feita de forma semelhante à explanada na versão detalhada da ferramenta. No entanto, assume-se agora, para efeitos de estimação do rendimento do motor, que este é de classe IE2 e 4 polos, por ser o mais presente na indústria. Nas ferramentas de motores, estes dados de *input* eram essenciais à escolha de um novo motor, o que no caso de VEV não acontece.

Nas ferramentas VEV, apenas a potência nominal do motor contribui para os parâmetros de seleção do equipamento.

3.4.2 Características de Operação

Como referido, nesta versão da ferramenta, alimentam-se as entradas relativas aos regimes de carga e tempos de operação com regimes típicos por aplicação. Assim, o cliente fica dispensado da inserção destes dados.

O número de horas anuais de funcionamento do sistema é um dado que é fornecido pelo cliente, com bastante precisão e relativa facilidade.

Mostram-se aqui algumas curvas com perfis de carga/caudal encontradas na bibliografia, que contribuem para alimentação do modelo.

As aplicações de binário linear e constante são tratadas como na versão detalhada.

3.4.3 Caracterização da Carga/Aplicação

A caracterização do sistema a jusante do motor faz-se, tal como na versão detalhada, através do tipo de aplicação e do método de controlo, possibilitando assim, através das curvas de potência *vs* caudal, a definição do fator de carga, e posteriormente o cálculo da potência consumida atual em cada regime.

3.4.4 Caracterização do Cenário Atual

Tal como na versão detalhada da ferramenta, a caracterização do cenário atual tem como objetivo o cálculo da energia consumida anualmente (figura 3.16).

Os regimes de operação são regimes típicos, tendo em conta o tipo de aplicação.

Internamente no modelo, a energia consumida anualmente referente ao consumo atual, é calculada como a soma da energia consumida em cada regime.

Internamente assume-se também que o motor em funcionamento é um IE2, 4 polos.

3.4.5 Caracterização do Cenário Futuro

O cálculo da energia consumida anualmente faz-se tomando uma estratégia semelhante à usada na caracterização do cenário atual, assumindo no entanto que o método de controlo anterior é substituído pela variação eletrónica de velocidade (figura 3.17).

3.5 Análise Económica e *Procurement*

A análise económica tem como objetivo em primeira instância dar a conhecer os dados (em síntese) que têm que ver com o investimento e com os benefícios estimados no período pós intervenção, nomeadamente:

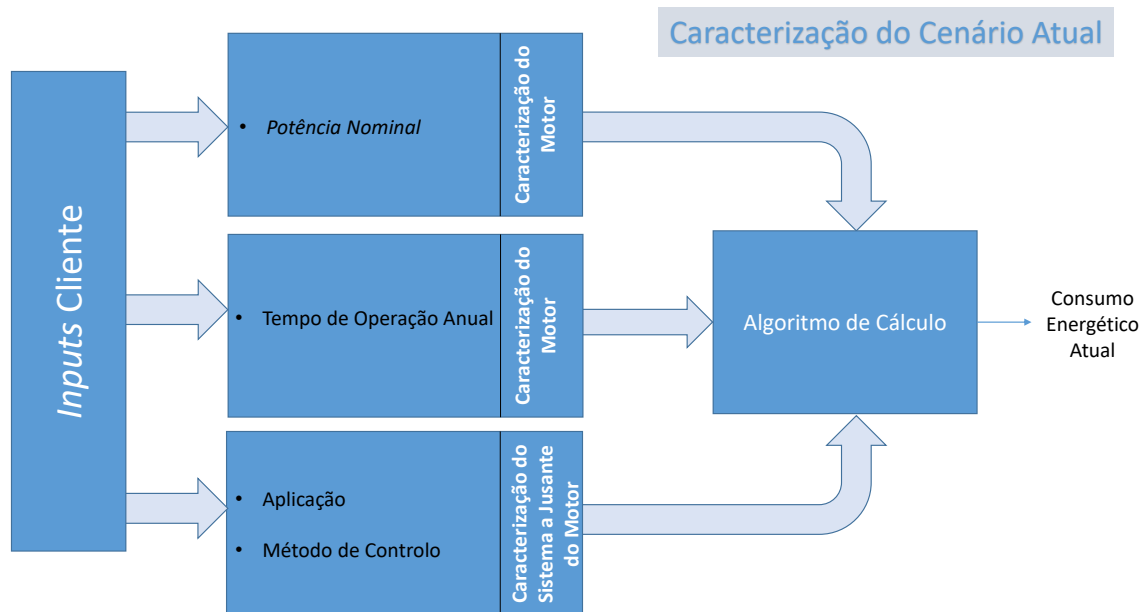


Figura 3.16: Representação esquemática relativa à caracterização do cenário atual, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.

- Investimento total (€);
- Poupança anual bruta (€);
- Redução anual na fatura de energia (%);
- *Payback* simples (anos);
- TIR a 15 anos;
- VAL a 15 anos.

Na obtenção do valor total de investimento, toma grande importância a fase de consulta a fornecedores e instaladores. Através destas consultas, constroem-se as bases de dados com informação técnicas e económicas de cada produto.

Todos os produtos integrantes da base de dados, estão de acordo com as normas europeias em vigor referidas na secção 2.2.1, e encontram-se dentro das especificações técnicas referenciadas na secção 2.1.6.

Na base de dados de motores, cada equipamento é discriminado através dos seguintes parâmetros:

- Marca do fabricante (consulta feita a 3 fabricantes);
- Potência nominal;
- Classe de eficiência;

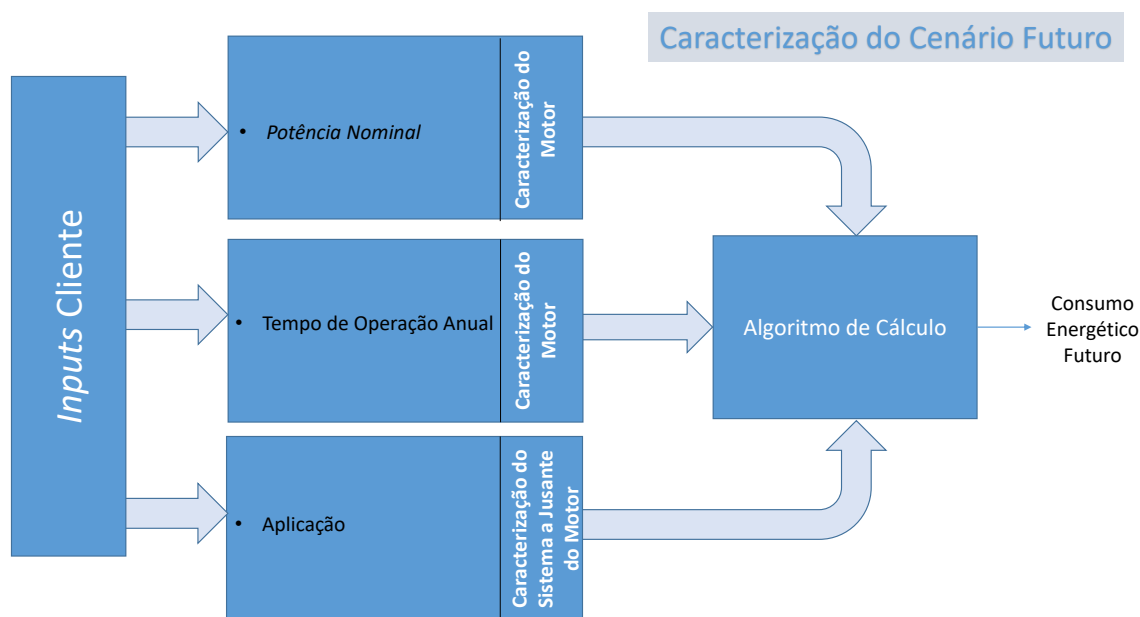


Figura 3.17: Representação esquemática relativa à caracterização do cenário futuro, para efeitos de cálculo da potência consumida anualmente pelo sistema.

- Número de polos;
- Eficiência a 50%, 75% e 100% da carga nominal;
- Custo do equipamento;
- Custo adicional para transmissão por correias;
- Custo para rolamentos tipo NU.

Do lado dos instaladores:

- Custo de transporte;
- Custo de instalação;
- Comissionamento.

Relativamente às medidas de VEV, cada equipamento é caracterizado pelos seguintes parâmetros :

- Potência nominal;
- Custo do VEV (IP21);
- Adicional para filtros $\frac{dU}{dt}$;
- Custo de quadro para comando manual e consola;

- Custo de quadro para comando [PID](#).

Cada equipamento possui também dados relativos à sua instalação:

- Custo de transporte;
- Custo de instalação e comissionamento.

A poupança anual bruta provém diretamente da redução dos custos energéticos anuais estimados. Um cliente que invista em mais do que uma intervenção, verá uma poupança anual bruta correspondente à soma das economias de cada intervenção.

A redução anual na fatura, depreende como *input* o valor anual da fatura de energia elétrica do cliente, e exprime-se da seguinte forma:

$$\text{Redução Anual na Fatura} = \frac{\text{Poupança Bruta Anual}}{\text{Fatura Anual}} [\%] \quad (3.14)$$

O *payback* simples, também conhecido como tempo de retorno do investimento, permite fazer a análise do tempo necessário para que se recupere o montante investido, sem que se considere o valor temporal do capital. Assim, este calcula-se através da seguinte expressão:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento}}{\text{Poupança Bruta Anual}} \quad (3.15)$$

O Valor Atual Líquido (VAL) de um Investimento é o somatório dos *cash-flow* (CF_t) ocorridos em cada ano, t , que caracterizam esse investimento, depois de convertidos a uma taxa de atualização i , convenientemente escolhida.

$$VAL = \sum_{t=0}^n CF_t (1+i)^{-t} \quad (3.16)$$

O conceito de investimento, neste contexto, pode ser definido como a substituição de capitais presentes por capitais futuros, que do ponto de vista do investidor, deverá conduzir a um aumento do valor dos capitais substituídos.

A Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) é a taxa de atualização para a qual o VAL do investimento é nulo.

3.6 Reunião de Engenharia com Auditor

Na fase que antecedeu o arranque da implementação das ferramentas, concretizou-se a oportunidade de reunir com um auditor na área da eficiência energética, energias renováveis e gestão de energia, tendo sido partilhados esquemas metodológicos e algoritmos propostos. Este encontro mostrou-se importante na medida em que foi possível recolher

algumas impressões sustentadas pela experiência do auditor, que mais tarde viriam a influenciar a estratégia metodológica relativa ao modelo implementado.

Esta partilha de conhecimentos mostrou-se importante com foco em cinco pontos principais:

1. Validação das curvas típicas de consumo/economia, relativamente às aplicações e tipo de carga apresentadas;
2. Validação dos valores típicos médios de economia energética, tendo em conta diferentes tipos de aplicação e carga acionada;
3. Passagem de conhecimento a nível de medição *in-situ*, e acerca do processo algorítmico de cálculo de valores pertinentes à avaliação no contexto da auditoria energética. O auditor acrescenta ainda que, para que se faça uma avaliação com alguma precisão, basta que se possuam dados relativamente à corrente e $\cos \varphi$;
4. O auditor contribui para o modelo relativamente à consideração de *Downsizing* na substituição de motores. Devido à volatilidade e variabilidade dos processos no contexto industrial, a consideração do *Downsizing* de motores acarreta sempre um risco considerável apesar dos benefícios que possa trazer.

Repare-se que, pelo facto de em dias de M&V, o motor apresentar níveis de carga baixos existe a possibilidade de haver situações pontuais em que deste é exigida toda a sua potência e/ou binário, onde um motor com mais baixo calibre pode ver o seu binário máximo ultrapassado, ou noutras situações ficar incapacitado no arranque.

Esta é portanto uma prática que exige um estudo bastante mais aprofundado do sistema, e dos detalhes operacionais em cada caso;

5. Um valor que é facultado pelo cliente, e por norma, se pode considerar bastante fidedigno é o número de horas anuais de funcionamento de cada aplicação.

IMPLEMENTAÇÃO

As versões finais das ferramentas são implementadas em *Excel* e VBA. Através da plataforma online, são injetados os dados de *input* numa *sheet* "*inputs*", dedicada para o efeito. Os dados de *output*, calculados nas *sheets* referente ao modelo, são depois disponibilizadas numa *sheet* "*output*", onde são colhidos e tratados pela plataforma.

Neste capítulo pretende-se clarificar a dinâmica interna de cada modelo, mostrando de forma mais detalhada os algoritmos de cálculo usados.

Através de esquemas com blocos, pretende-se expor de forma mais intuitiva o funcionamento implementado em cada ferramenta, explicando posteriormente a lógica interna implementada, mostrando fórmulas matemáticas usadas. Na figura 4.1 apresenta-se a simbologia usada no desenvolvimento do presente capítulo.

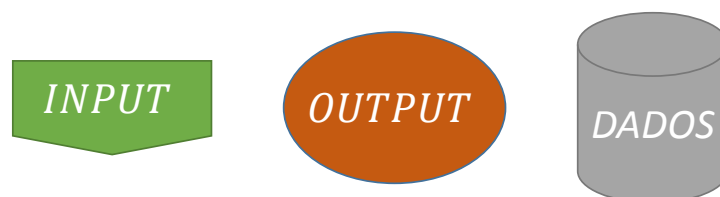


Figura 4.1: Simbologia utilizada na representação dos esquemas de fluxo dos modelos.

4.1 Motores de Alto Rendimento - Módulo Detalhado

Na ferramenta MAR detalhado, **o cliente apresenta o valor da potência média consumida**, caso tenha condições para efetuar ou consultar medições. Abaixo mostra-se em esquema, o funcionamento da ferramenta, caso o utilizador apresente o valor da potência

média. É representada simultaneamente a forma de implementação para o cálculo da Energia consumida no cenário atual e futuro na figura 4.2.

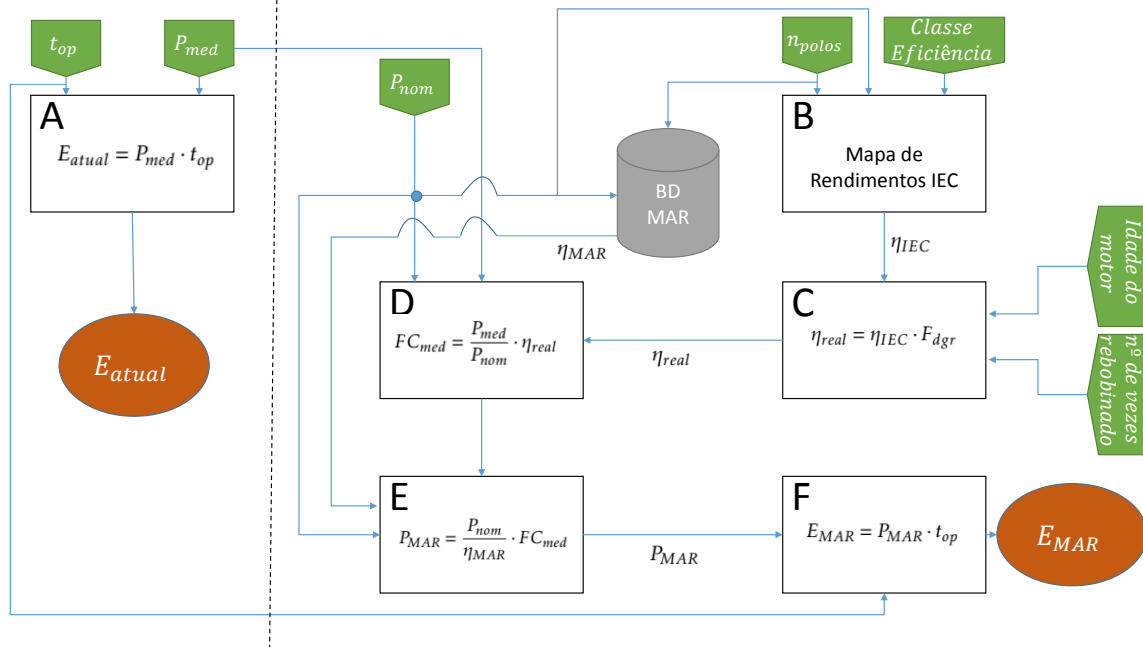


Figura 4.2: Representação esquemática do algoritmo implementado para o módulo MAR detalhado na situação em que o cliente procede a medições no terreno.

Abaixo descreve-se o funcionamento de cada “bloco” implementado.

A. O valor da Energia Consumida Anualmente [kWh/ano] pelo sistema atual vem dada pela multiplicação do Tempo de Operação Anual (h/ano) pelo valor da Potência Média consumida [kW].

B. As fórmulas IEC permitem mapear os rendimentos mínimos definidos pela norma IEC 60030-30, em função da Potência Nominal, do número de polos e classe de eficiência (figura 4.3).

C. Aplica-se ao rendimento obtido pelas fórmulas IEC, um fator de degradação que depende da idade (degradação 0,1% por ano) e do número de vezes que o motor foi rebobinado (0,5% por rebobinagem).

D. Calcula-se o Fator de Carga do motor, para que se alimente a fórmula representada no bloco E. Admite-se que o Fator de Carga se mantém na situação futura.

E. A potência estimada consumida para o novo motor (P_{MAR}), vem dada da forma mostrada em E. O rendimento do novo motor, η_{MAR} , é selecionado numa base de dados (que contém os dados de produto, fornecidos pelos fabricantes, correspondentes a cada motor), em função da potência nominal e do número de polos.

4.1. MOTORES DE ALTO RENDIMENTO - MÓDULO DETALHADO

RENDIMENTO (REGIME DE CARGA: 100%)				
POTÊNCIA	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
(kW)	(%)	(%)	(%)	(%)
0,12	60,8%	64,8%	57,7%	52,5%
0,18	65,9%	69,9%	63,9%	58,7%
0,25	69,7%	73,5%	68,8%	64,1%
0,37	73,8%	77,3%	73,5%	69,3%
0,55	77,8%	80,8%	77,2%	73,0%
0,75	81,0%	82,5%	79,0%	75,5%
1,1	83,0%	84,5%	81,0%	77,7%
1,5	84,5%	85,5%	82,5%	79,9%
2,2	86,3%	87,0%	84,5%	82,1%
3	87,3%	88,0%	85,8%	83,5%
3,7	87,9%	88,4%	86,3%	84,8%
4	88,4%	88,8%	86,8%	86,0%
5,5	89,4%	89,7%	88,0%	87,3%
7,5	90,3%	90,6%	90,7%	88,5%
11	91,4%	91,6%	91,2%	90,0%
15	92,1%	92,3%	92,0%	89,8%
18,5	92,6%	92,8%	92,5%	90,3%
22	92,9%	93,2%	92,9%	90,8%
30	93,5%	93,7%	94,0%	91,5%
37	93,8%	94,1%	94,4%	92,0%
45	94,2%	94,4%	95,0%	92,4%
55	94,4%	94,7%	95,3%	92,7%
75	94,9%	95,2%	95,8%	93,3%
90	95,2%	95,4%	96,1%	93,6%
110	95,4%	95,6%	96,2%	93,9%
132	95,6%	95,8%	96,3%	94,2%
150	95,6%	95,9%	96,4%	94,4%
160	95,8%	96,0%	96,4%	94,5%
185	95,8%	96,0%	95,8%	96,0%
200	96,0%	96,0%	95,9%	94,8%
220	96,0%	96,2%	96,0%	95,6%
250	96,0%	96,2%	95,9%	95,8%
300	96,0%	96,3%	96,0%	95,8%
315	96,0%	96,3%	95,8%	95,8%
330	96,0%	96,4%	95,8%	95,8%
355	95,8%	96,5%	95,8%	95,8%
375	95,8%	96,5%	95,8%	95,8%

Figura 4.3: Mapa de rendimentos construído com base nas expressões de cálculo para os requisitos mínimos de eficiência presentes nas normas IEC.

F. A energia consumida anualmente [kWh/ano] com o novo motor é dada pela multiplicação da potência elétrica absorvida pelo motor IE3 [kW] pelo Tempo de operação anual [h/ano].

Seguidamente apresenta-se o esquema de implementação, caso o cliente opte por caracterizar a situação do sistema **através da desagregação em regimes**. Na caracterização do **cenário atual**, e para cada regime, a ferramenta funciona da forma descrita na imagem 4.4. Descreve-se de seguida os restantes blocos implementados:

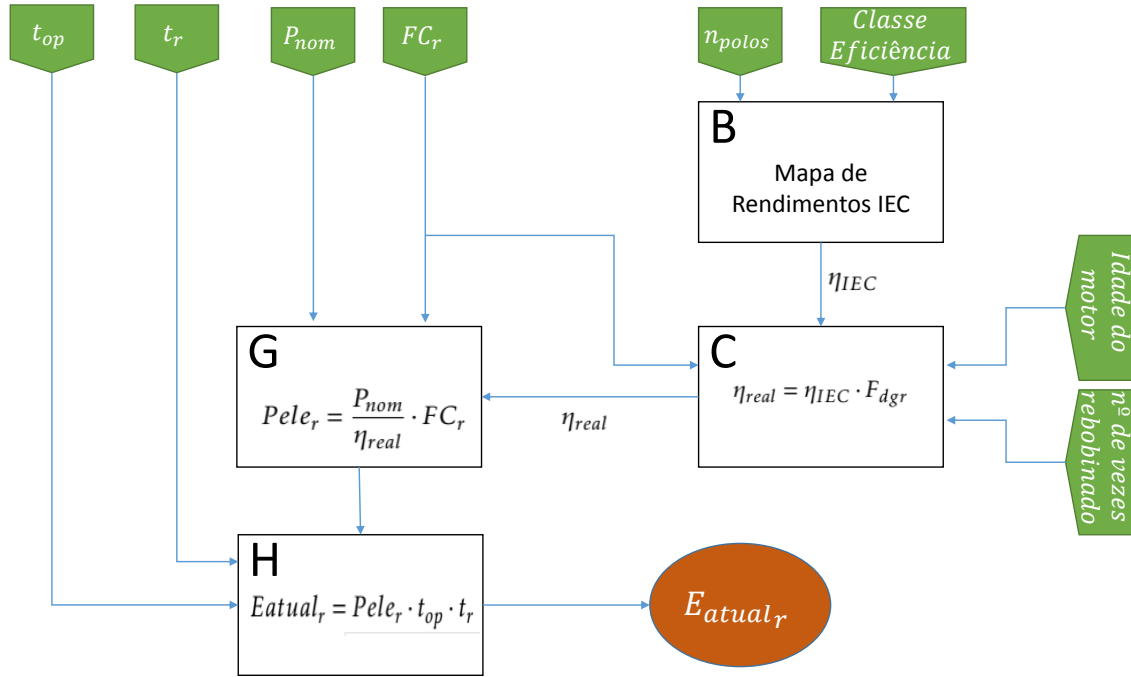


Figura 4.4: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo MAR detalhado na situação em que o cliente procede à caracterização dos regimes de carga.

G. Em cada regime r a Potência absorvida [kW] vem calculada em função da Potência Nominal [kW], do rendimento [%] e do Fator de Carga [%].

H. A energia consumida anualmente no regime r [kWh/ano] vem dada pela Potência absorvida nesse regime, multiplicada pelo número de horas de operação anuais [h/ano] vezes a percentagem de tempo relativa às horas que o sistema opera no regime em causa, em relação ao tempo total [%].

O esquema de implementação relativo ao **cenário futuro**, mostra-se na figura 4.5.

I. Tal como em **E**, recorre-se aos dados disponibilizados pelo fabricante referentes a cada produto, com o intuito de saber o rendimento do motor de substituição consoante a Potência Nominal e Número de polos. Consideram-se apenas motores IE3. A este rendimento aplica-se um fator de degradação, caso o fator de carga se apresente menor a 30%.

J. A Potência elétrica absorvida estimada para o cenário pós-intervenção, em cada regime, vem dada em função da potência nominal [kW], η_{MAR} [%] e pelo Fator de Carga [%] considerado no regime r .

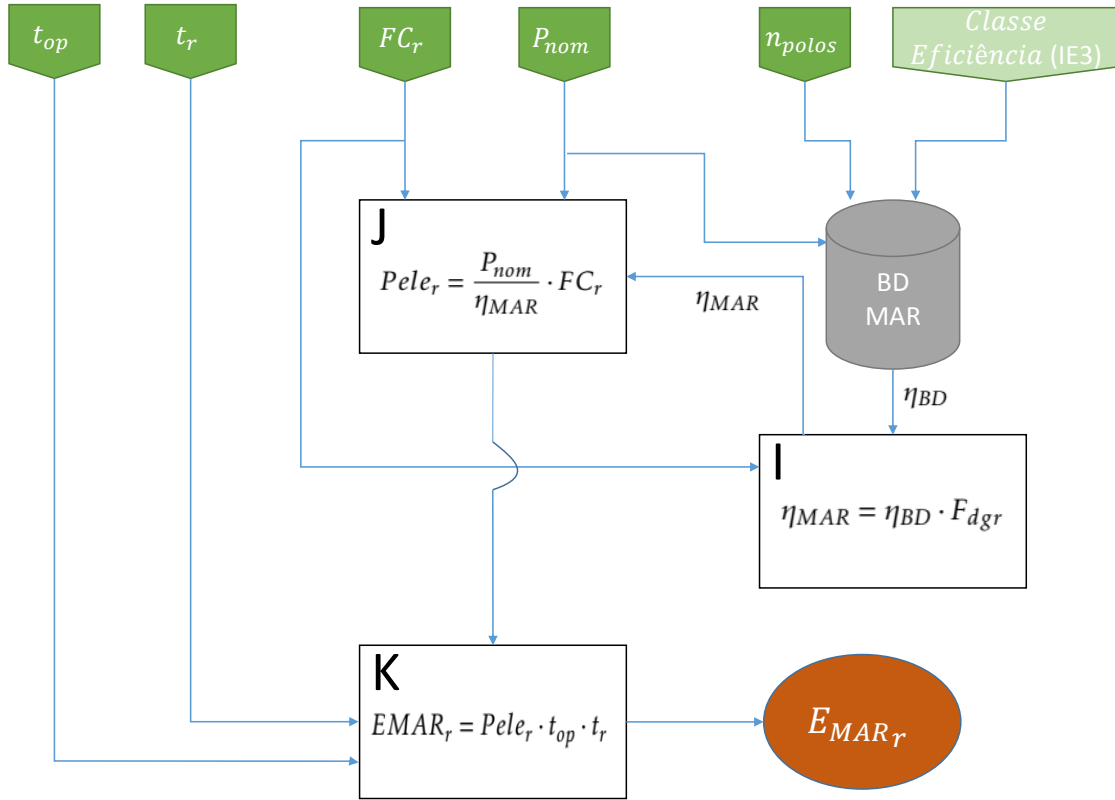


Figura 4.5: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo MAR detalhado, na situação em que o cliente procede à caracterização dos regimes de carga.

K. A Energia consumida anualmente pelo MAR no regime r , virá dada pela potência absorvida nesse regime, multiplicada pelo número de horas de operação anuais, t_{op} [h/ano], vezes a percentagem de tempo relativa a t_{op} [h] que o motor opera no regime em causa $\%t_r[\%]$.

4.2 Motores de Alto Rendimento - Módulo Simples

Na ferramenta MAR simples, considera-se apenas um regime, isto é, pede-se o valor do Fator de carga médio.

O esquema que representa a implementação da ferramenta MAR simplificada, no que respeita à caracterização do **cenário atual**, apresenta-se na figura 4.6.

A. As fórmulas IEC, permitem mapear os rendimentos mínimos definidos pela norma IEC [31], em função da potência nominal, do número de polos e classe de eficiência.

B. Aplica-se ao rendimento um fator de degradação para Fatores de Carga inferiores

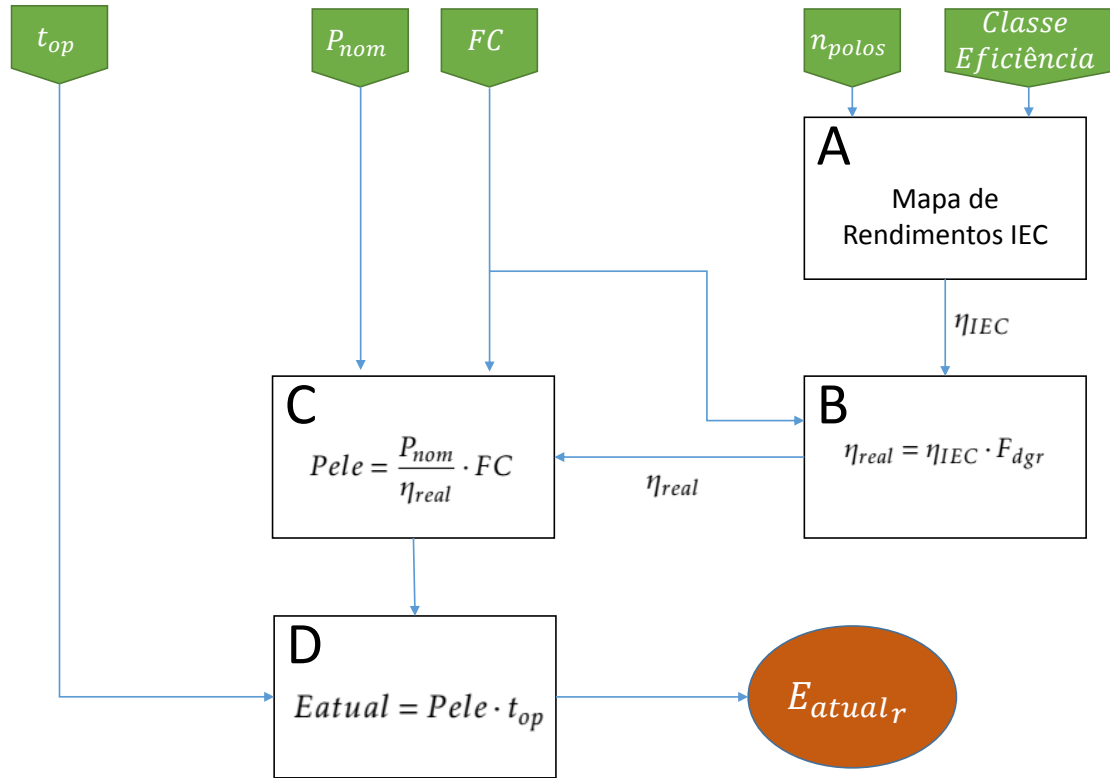


Figura 4.6: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo MAR simplificado.

a 30%.

C. A potência elétrica absorvida no cenário atual é dada pelo quociente entre a Potência Nominal [kW] e o rendimento considerado para o motor [%], multiplicado pelo valor do Fator de carga médio.

D. A Energia consumida pelo motor no cenário atual é dada como produto da potência absorvida [kW] pelo Tempo de operação anual [h/ano].

Relativamente à **situação futura**, a ferramenta encontra-se implementada como representado na figura 4.7.

E. Recorre-se aos dados disponibilizados pelo fabricante referentes a cada produto, com o intuito de saber o rendimento do motor de substituição consoante a Potência Nominal e Número de Polos. Mais uma vez, consideram-se apenas motores IE3. A este rendimento aplica-se um fator de degradação a η_{BD} , caso o fator de carga se apresente menor a 30%.

F. A potência elétrica absorvida pelo novo motor vem dada em função da potência

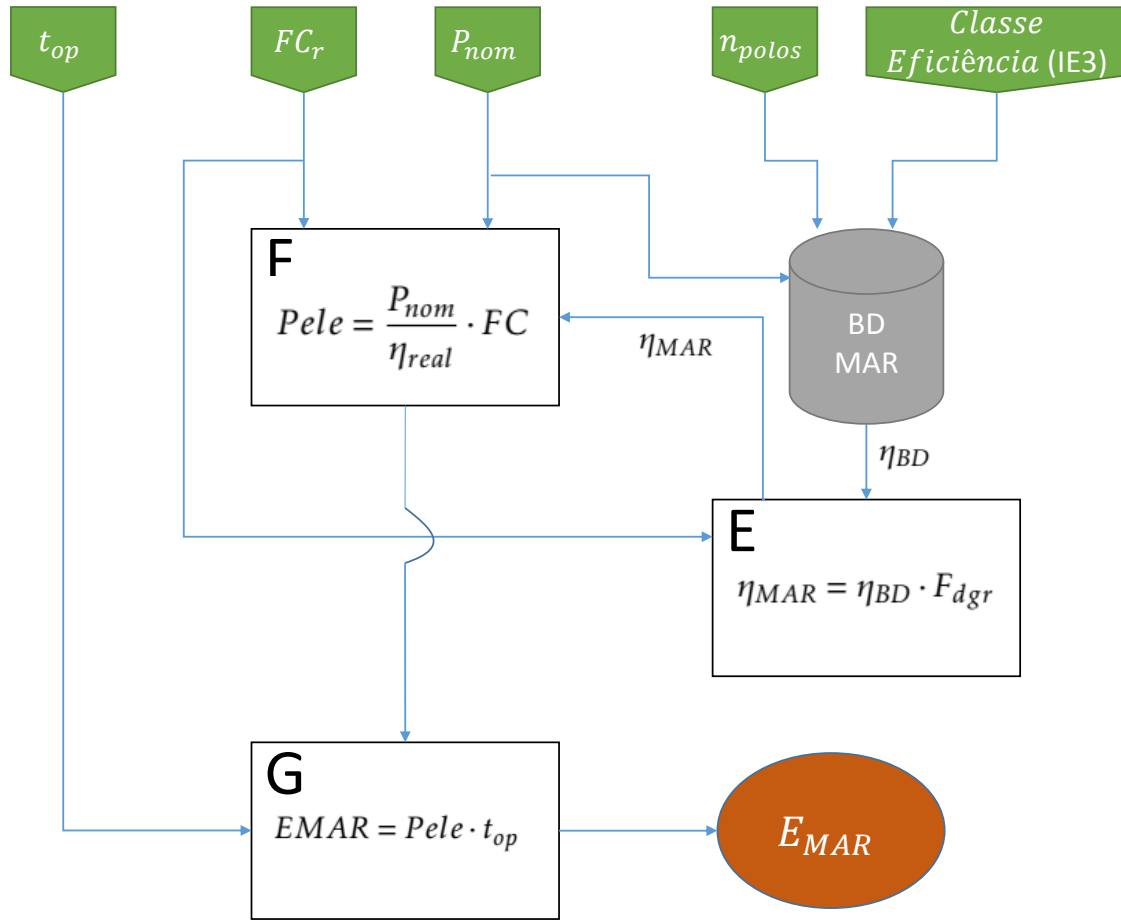


Figura 4.7: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo MAR simplificado.

nominal, P_{nom} [kW], do Fator de Carga FC [%], e do rendimento η_{real} [%] considerado para o motor.

G. A energia consumida anualmente após a instalação do motor IE3 é dada como produto da potência absorvida, P_{ele} , pelo Tempo de operação anual t_{op} [h/ano].

4.3 Variadores Eletrônicos de Velocidade - Módulo Detalhado

Na imagem 4.8, é possível observar o esquema que representa o algoritmo implementado na ferramenta VEV detalhada, para obtenção da energia consumida anualmente, no **cenário atual** (em cada regime).

A. As fórmulas IEC, permitem mapear os rendimentos mínimos definidos por [31], em função da Potência Nominal, do número de polos e classe de eficiência.

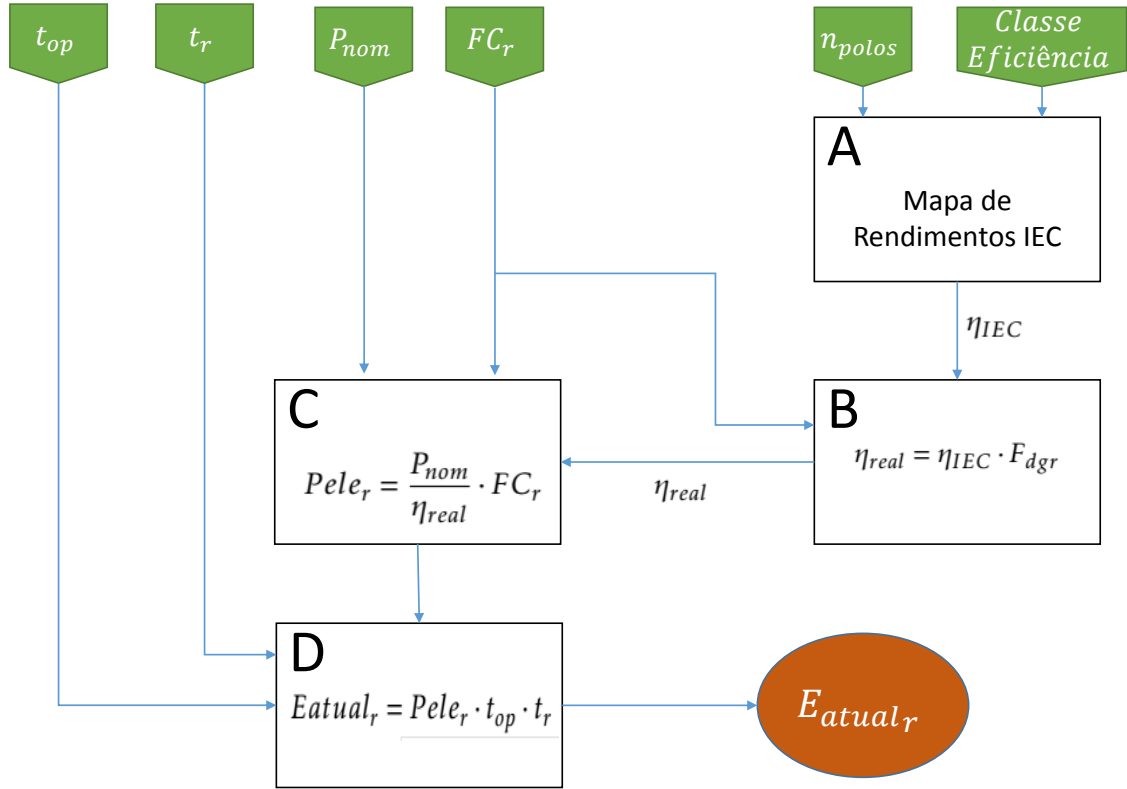


Figura 4.8: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo VEV detalhado.

B. A este rendimento aplica-se um fator de degradação a η_{BD} caso o fator de carga se apresente menor a 30%. Caso contrário, $F_{dgr} = 1$.

C. Em cada regime r a Potência absorvida [kW] vem calculada em função da Potência Nominal [kW], do rendimento [%] e do Fator de Carga [%].

D. A energia consumida anualmente no regime r [kWh/ano] vem dada pela Potência absorvida nesse regime, multiplicada pelo número de horas de operação anuais [h/ano] vezes a percentagem de tempo relativa às horas que o sistema opera no regime em causa, em relação ao tempo total [%].

Em relação à caracterização do **cenário futuro**, representa-se esquematicamente a implementação na figura 4.9.

4.3. VARIADORES ELETRÓNICOS DE VELOCIDADE - MÓDULO DETALHADO

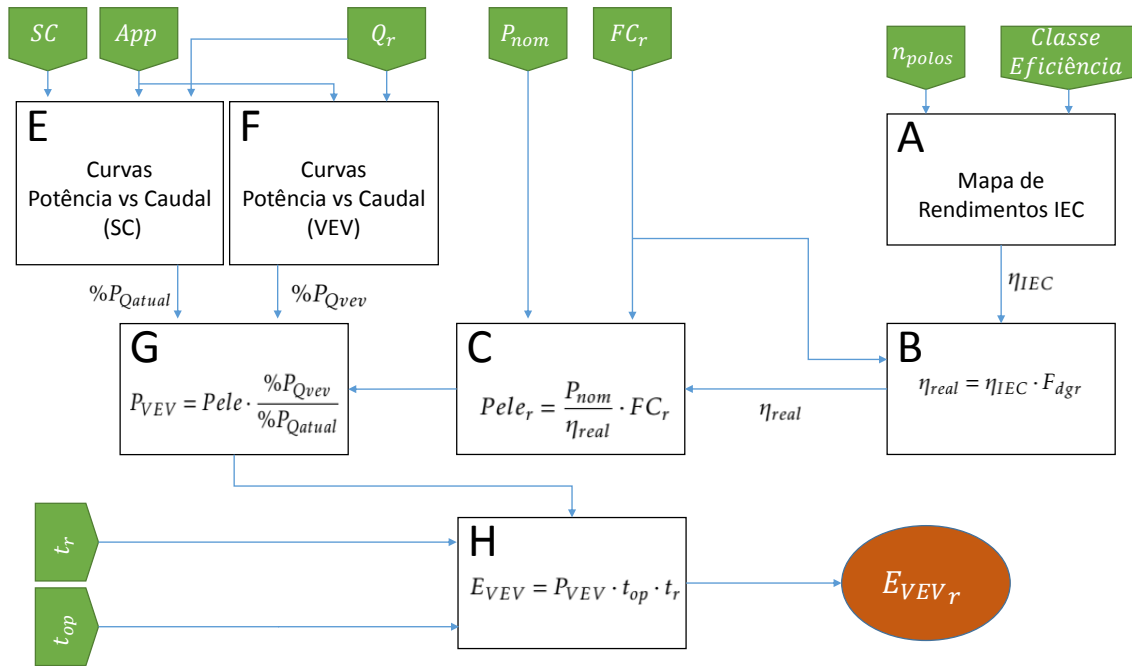


Figura 4.9: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo VEV detalhado.

E. Com base no tipo de aplicação (App) e no sistema de controlo (SC) presente no sistema, é seleccionada a curva de potência vs caudal correspondente. No contexto, apresentam-se ao utilizador as opções presentes na imagem 4.10.

Em relação ao método de controlo existente, as opções são disponibilizadas de forma

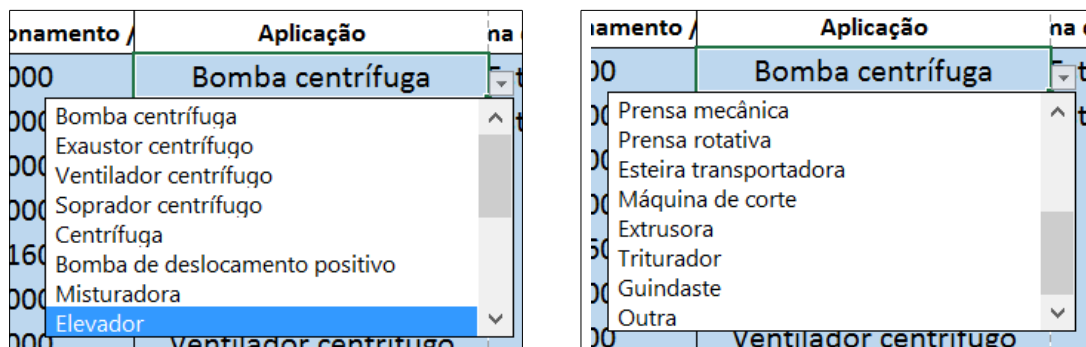


Figura 4.10: Menu *Drop-down* para seleção da aplicação.

condicional, em função da aplicação. Dão-se na figura 4.11 alguns exemplos.

Através das curvas já referidas, é devolvida a percentagem da potência necessária para que se trabalhe no caudal Q_r em relação à potência necessária para que se trabalhe ao caudal nominal. As curvas para aplicações de binário quadrático implementam-se segundo as seguintes expressões:

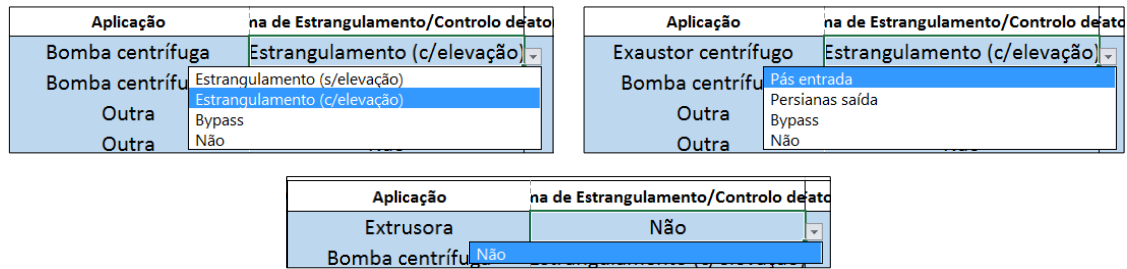


Figura 4.11: Menu *Drop-down* condicional, para seleção do método de redução de caudal (caso aplicação selecionada seja bombagem ou ventilação).

Estrangulamento por válvula

$$\%P(Q_r) = 0,2561 Q_r + 74,385 \quad (4.1)$$

Pás entrada

$$\%P(Q_r) = 0,0077 Q_r^2 - 0,1898 Q_r + 59,633 \quad (4.2)$$

Persianas saída

$$\%P(Q_r) = -0,006 Q_r^2 + 1,3098 Q_r + 47,167 \quad (4.3)$$

Bypass

$$\%P(Q_r) = 100 \quad (4.4)$$

F. Em função da aplicação, selecionam-se as curvas de potência vs caudal correspondentes. Em função do caudal no regime, seleciona-se a percentagem de potência necessária relativamente à potência de caudal nominal, para que com o sistema acionado por variador eletrónico de velocidade se debite o mesmo caudal que na situação atual.

As curvas VEV consideradas são descritas pelas seguintes fórmulas:

Sistemas de Bombagem - VEV sem elevação

$$\%P_{VEV}(Q_r) = e \cdot Q_r^4 + d \cdot Q_r^3 + c \cdot Q_r^2 + b \cdot Q_r + a \quad (4.5)$$

com,

a=5,1577;

b=0,0348;

c=0,0067;

d=0,00003;

e=0,00000003.

4.3. VARIADORES ELETRÔNICOS DE VELOCIDADE - MÓDULO DETALHADO

Sistemas de Bombagem - VEV com elevação

$$\%P_{VEV}(Q_r) = e \cdot Q_r^4 + d \cdot Q_r^3 + c \cdot Q_r^2 + b \cdot Q_r + a \quad (4.6)$$

com,

$$a=19,979;$$

$$b=0,0191;$$

$$c=0,0013;$$

$$d=0,00008;$$

$$e=-0,0000001.$$

Sistemas de Ventilação

$$\%P_{VEV}(Q_r) = g \cdot Q_r^6 + f \cdot Q_r^5 + e \cdot Q_r^4 + d \cdot Q_r^3 + c \cdot Q_r^2 + b \cdot Q_r + a \quad (4.7)$$

com,

$$a=4,2361;$$

$$b=0,3419;$$

$$c=-0,025261;$$

$$d=0,001335;$$

$$e=-0,000028112;$$

$$f=0,00000029292;$$

$$g=-0,0000000011393.$$

Bomba de deslocamento positivo

$$\%P_{VEV}(Q_r) = 0,0109 \left(\frac{50 \cdot Q_r}{100} \right)^2 + 1,3636 \left(\frac{50 \cdot Q_r}{100} \right) + 4,5455 \quad (4.8)$$

G. Para que se obtenha a Potência absorvida pelo sistema quando acionado por VEV, multiplica-se a potência absorvida no cenário atual, pelo quociente da percentagem da potência consumida no cenário VEV, pela associada ao sistema atual, ambas correspondentes ao mesmo caudal.

H. A Energia consumida anualmente pelo sistema acionado por VEV é dada pelo produto da potência consumida pelo sistema no regime r, pelo Tempo de Operação Anual t_{op} vezes a percentagem de tempo que o motor opera nesse regime.

4.4 Variadores Eletrônicos de Velocidade - Módulo Simples

Na ferramenta VEV simplificada usam-se regimes característicos de Carga/Caudal vs Tempo, para as diferentes aplicações.

Assume-se no entanto, no caso dos sistemas de Binário Quadrático que o caudal nominal corresponde a 100% da potência elétrica absorvida.

No cenário atual, a implementação pode ser representada da forma mostrada na figura 4.12.

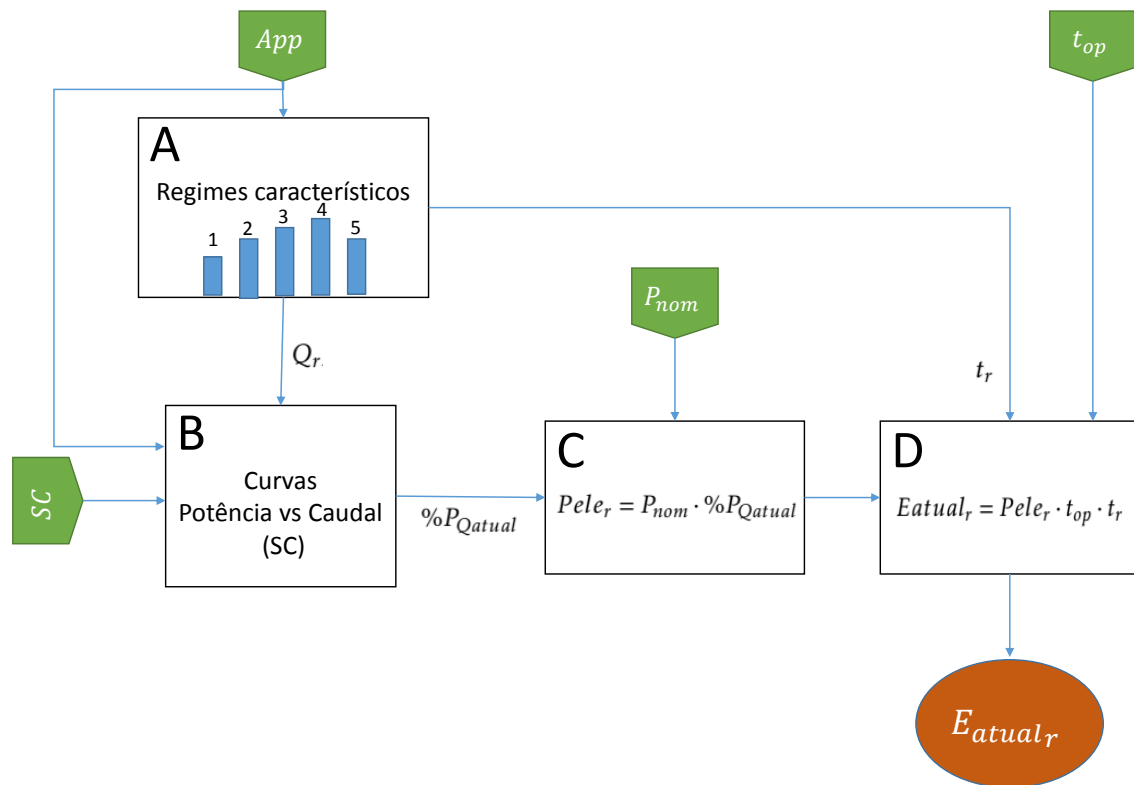


Figura 4.12: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário atual, no módulo VEV Simples.

A. Baseado em regimes característicos em função do tipo de aplicação, alimenta-se o próximo bloco com os valores de caudal característicos.

B. Baseado na aplicação e no sistema de controlo existente selecionam-se as curvas de consumo em função do caudal. O caudal considerado em cada regime corresponderá a uma percentagem da potência consumida, relativamente à qual se debita o caudal nominal.

C. Repare-se que se admite que ao valor de caudal nominal corresponde a potência nominal, não considerando o possível sobre-dimensionamento do sistema. Assim a potência

elétrica absorvida [kW] virá dada como a Potência Nominal vezes a percentagem desta potência, necessária para que o sistema funcione com o caudal considerado para o regime.

D. A Energia Consumida anualmente [kWh/ano] no cenário atual, vem dada pela Potência Elétrica associada ao caudal [%] considerado para o regime, vezes o produto do tempo de operação anual pela percentagem desse tempo que o sistema opera nesse regime.

No que respeita ao modelo implementado para cálculo da energia consumida no **cenário futura**, apresenta-se o seguinte esquema na figura 4.13.

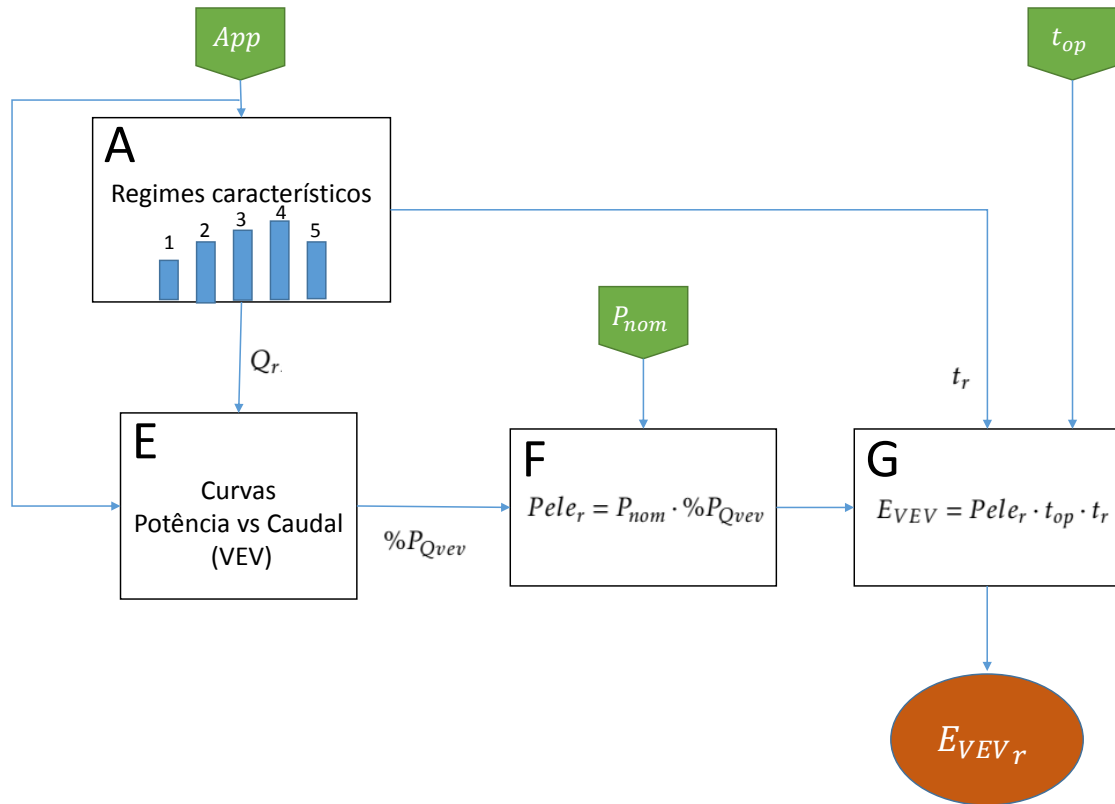


Figura 4.13: Representação esquemática do algoritmo implementado para o cálculo da energia consumida no cenário futuro, no módulo VEV simplificado.

E. Consoante a aplicação, seleciona-se a curva de consumo associada no contexto da variação eletrónica de velocidade. Com base na percentagem relativa ao caudal nominal %Q_r num dado regime, extrai-se a percentagem da potência de caudal nominal associada no regime em questão.

F. O valor percentual resultante de E. multiplicada pelo valor da Potência Nominal [kW] permite calcular, a potência absorvida nesse regime.

G. A energia consumida anualmente em cada regime é calculada através da potência elétrica vezes o número de horas de operação nesse regime, $t_{op} \cdot t_r$ [h/ano].

4.5 Análise ao Modelo e Visualização Gráfica de Indicadores Relevantes

Aquando do fecho das versões detalhadas das ferramentas, equacionou-se a realização de uma análise de sensibilidade aos modelos.

Esta análise teria como objetivo obter fatores que permitissem identificar quais os *inputs* cuja variação teria maior influência nos valores de saída.

Elaborou-se um *script* em VBA que permite correr as ferramentas de forma automática, injetando dados à entrada do modelo cujo valor é variado, registando-se os resultados de cada simulação (de entrada e saída). Estes dados são então guardados num ficheiro .CSV, para que se proceda à sua análise em R.

Posteriormente, este esforço acaba por se revelar infrutífero, já que se chega à conclusão de que no caso das ferramentas de MAR, deveria ser feita a simplificação, com atenção aos dados indispensáveis (ou não) ao funcionamento do modelo, mais precisamente aqueles que permitem o cálculo dos valores das energias consumidas em ambos os cenários, tal como a seleção de equipamentos com recurso à base de dados com as suas características.

No entanto, o *script* desenvolvido revelou-se de extrema importância no *debug* das ferramentas e na análise do modelo através do tratamento e visualização dos dados, permitindo sustentar o modelo.

De facto, é possível através das simulações efetuadas ao modelo e da visualização gráfica dos resultados, tirar conclusões pertinentes.

Para que se extraia informação relevante da visualização gráfica, e tirando partido da informação recolhida na secção 2.2.2, que permite fazer uma caracterização relativamente aos parâmetros dos motores presentes na indústria, define-se um caso padrão que constitui a base do seguinte estudo.

4.5.1 Análise ao Modelo: MAR

No caso do modelo MAR, tomam-se os seguintes parâmetros para a caracterização da situação base:

- Preço da energia: 0,08 €/kWh;
- Horas de funcionamento anuais: 5000 h;
- Classe de eficiência: IE1;
- Fator de carga médio: 60%;

- Número de polos: 4;
- Investimento inclui: Custo do produto, material, instalação e transporte.

Para uma visualização dos resultados mais adequada, procede-se quando se considerar necessário, à divisão dos casos a estudar em motores em grupos com $P_{nominal} < 30kW$ e $P_{nominal} \geq 30kW$.

Custo de investimento em função da Potência Nominal

Observa-se na imagem 4.14 o custo de investimento no *retrofitting* de motores IE3 de 4 polos em função da potência nominal. A evolução do custo de investimento cresce de forma aproximadamente linear com a potência estipulada do motor.

Não sendo mostrado graficamente, realça-se o facto dos motores de 4 polos apresentarem preços substancialmente mais reduzidos que os restantes (2, 6 e 8 polos), detendo assim um ligeiro maior potencial de retorno.

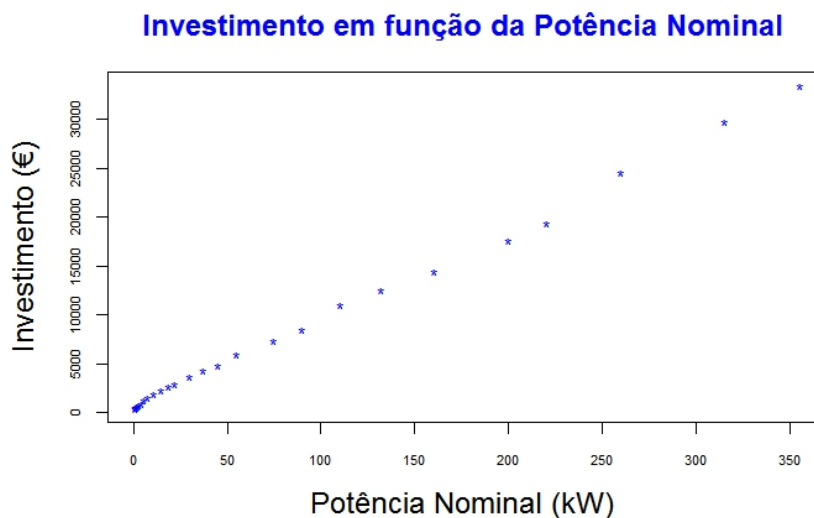


Figura 4.14: Custo de investimento em função da potência nominal

Diferença na Eficiência para diferentes classes de eficiência

Na imagem 4.15, observa-se uma tendência para o aumento da diferença na eficiência para potências nominais abaixo de 30kW. Interpretando os dados de simulação, percebe-se um maior potencial de investimento em motores de gamas inferiores a 30kW.

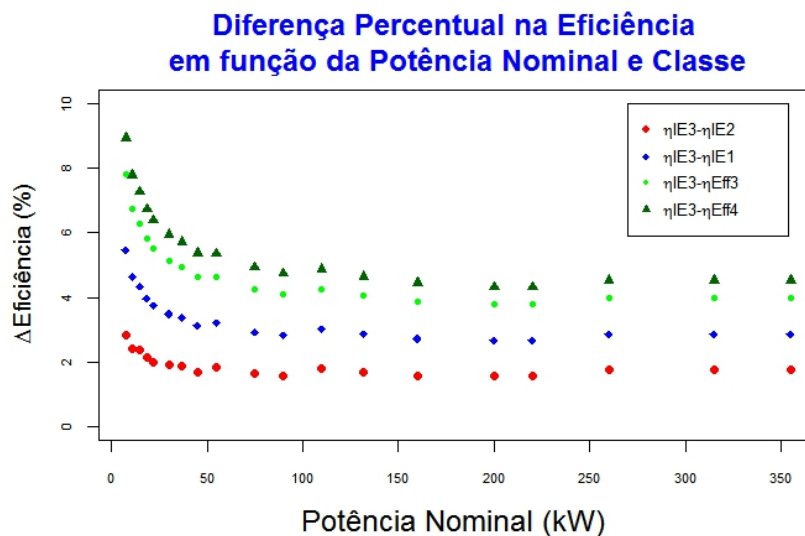


Figura 4.15: Diferença percentual na eficiência em função da classe de eficiência do motor presente na instalação em relação a IE3.

Preço por kilowatt (€/kW)

É possível observar, na figura 4.16, um custo por *kilowatt* substancialmente mais elevado para potências abaixo dos 30kW. Assim os ganhos potenciais preconizados devido aos ganhos de eficiência superiores, para gamas de baixo calibre, poderão ver-se atenuados, ou mesmo anulados, pelo maior custo relativo para gamas abaixo dos 30kW.

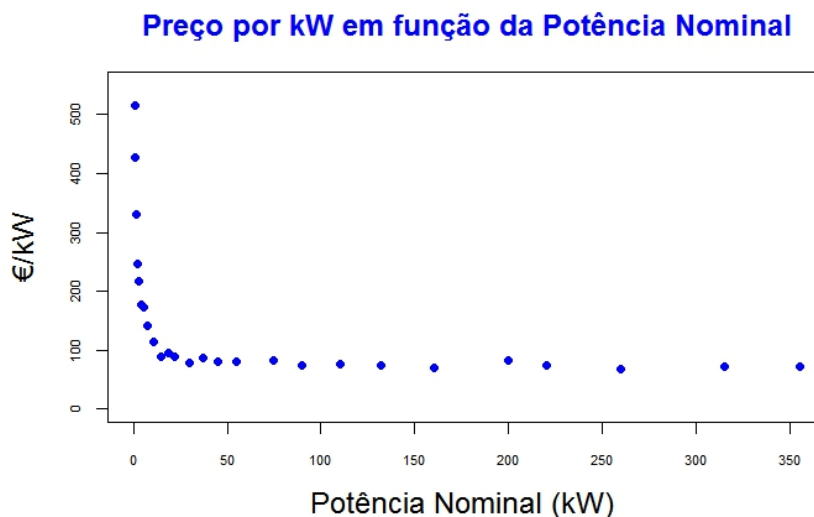


Figura 4.16: Preço por *kilowatt* de motores IE3 de 4 polos (custo total da medida).

Consumo Economizado em função da Potência nominal e Classe de eficiência

Observa-se na imagem 4.17, um crescimento linear nos ganhos com o aumento da potência nominal dos motores. Logicamente, instalações que apresentem motores com classes de eficiência mais baixas, apresentam um maior potencial de investimento.

Atente-se no facto que se a substituição Eff3/IE3 apresenta mais do dobro dos ganhos energéticos de uma substituição IE2/IE3.

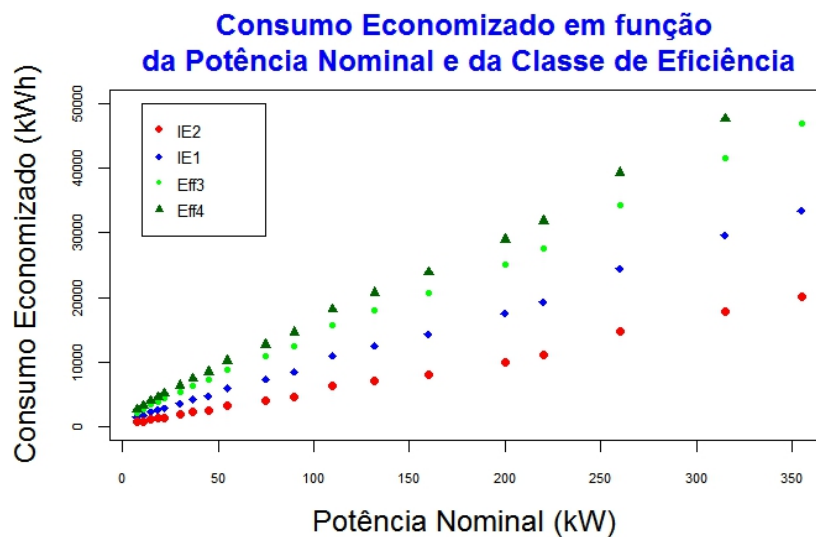


Figura 4.17: Ganhos energéticos no *retrofitting* de motores IE3 de 4 polos em função da classe de eficiência do motor presente na instalação, para várias potências comercialmente disponíveis, para 5000 horas de operação anuais.

Payback em função da classe de eficiência e Potência Nominal do motor presente na instalação

Atentando mais uma vez ao grupo, cuja potência nominal é inferior a 30kW, observam-se independentemente da potência do motor presente na instalação TRI's significativamente inferiores.

Os "saltos" abruptos observados na imagem 4.18, no que respeita aos tempos de retorno de investimento (Ex: $P_{nominal} = 200kW$), são justificáveis devido aos custos de instalação, cujo os valores são tabelados por gamas (os preços detalhados não são apresentados, mantendo-se confidenciais).

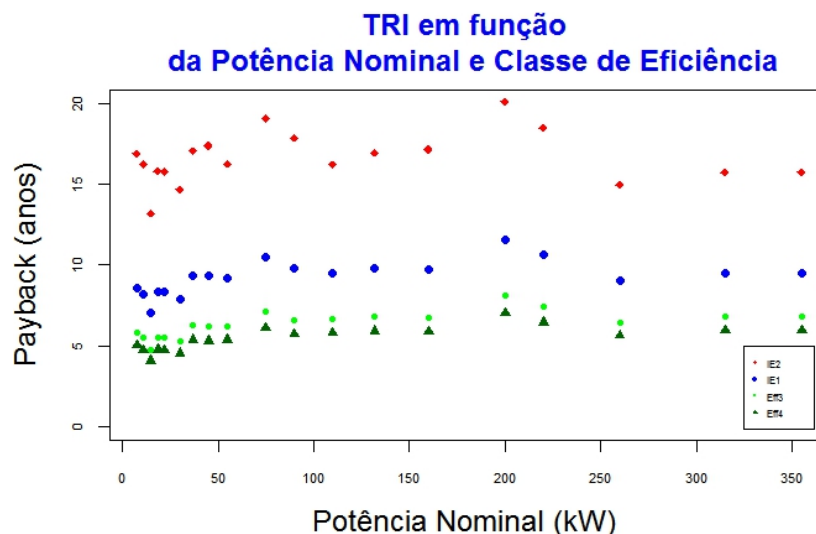


Figura 4.18: Payback simples em função da classe de eficiência do motor presente na instalação, para as várias potências nominais comercialmente disponíveis, para 5000 horas de funcionamento anual.

Payback em função da classe de eficiência e número de horas de operação anual

Da imagem 4.19, é possível inferir prontamente que o investimento na troca de um motor que trabalhe menos de 4000 horas/ano dificilmente constituirá um bom investimento, já que estes possuem tempo de vida útil de 15 anos para gamas de potência baixas e 20/25 anos para gamas média/alta respetivamente.

Pela informação absorvida na secção 2.2.2, onde se diz que em média motores de baixa potência nominal trabalham em média 3000 horas. Este tipo de investimento pode nunca chegar a pagar-se durante o tempo de vida útil esperado para o equipamento. Perde força assim, a tese apresentada que coloca os motores de baixa potência nominal como bom investimento, já que estes além disso, se caracterizam por um forte dimensionamento.

Payback em função do fator de carga do motor

Observando a imagem 4.20, há que destacar a importância do fator de carga do motor na avaliação técnico-económica da implementação da medida, podendo mesmo afirmar-se que o sobredimensionamento constitui uma barreira à viabilidade do investimento na substituição destes motores. Daqui surgem a popularidade de práticas alternativas como *downsizing* ou a rebobinagem.

Mais uma vez, é possível destacar os motores de média e alta potência como candidatos preferenciais neste tipo de investimento, já que estes, segundo a informação recolhida na secção 2.2.2, são caracterizados por apresentar sobredimensionamentos menores.

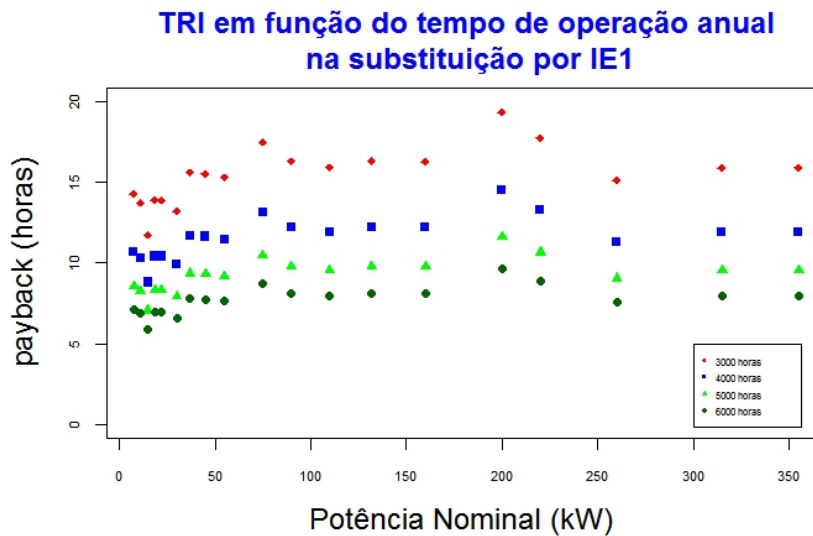


Figura 4.19: Payback simples em função do número de horas de funcionamento anual, motor 4 polos, IE1, com fator de carga médio de 60%.

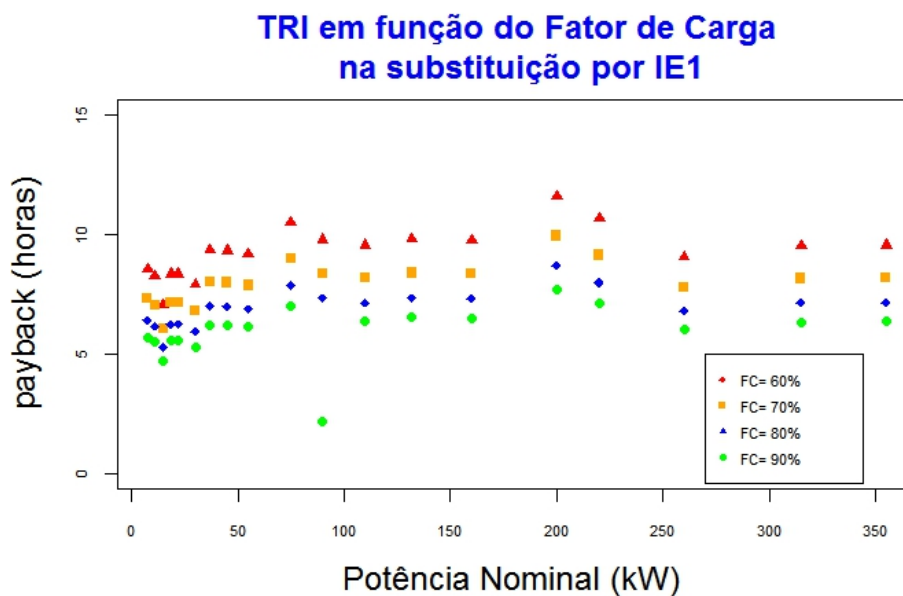


Figura 4.20: Tempo de retorno de investimento em função do fator de carga.

4.5.2 Análise ao Modelo: VEV

Na análise e validação do modelo de VEV, realiza-se o estudo através de três casos base (elege-se para efeitos de validação a situação onde se caracteriza um sistema de ventilação), onde em cada um, se procede à caracterização do perfil de operação através de três regimes de carga. Simula-se cada caso com métodos de controlo de fluxo: Persianas de saída, Pás de entrada e controlo de caudal por técnica *Bypass*.

Os três casos base são caracterizados infra:

1. Caso Base 1: Instalação normalmente dimensionada

- Aplicação: Ventilador Centrífugo;
- Método de Controlo: Pás de Entrada;
- Regime 1($\%FC_1, \%t_1, \%Q_1$): 100, 25, 100;
- Regime 2($\%FC_2, \%t_2, \%Q_2$): 67, 50, 75;
- Regime 3($\%FC_3, \%t_3, \%Q_3$): 60, 25, 50.

2. Caso Base 2: Motor Ligeiramente Sobredimensionado

- Aplicação: Ventilador Centrífugo;
- Método de Controlo: Pás de Entrada;
- Regime 1($\%FC_1, \%t_1, \%Q_1$): 90, 25, 100;
- Regime 2($\%FC_2, \%t_2, \%Q_2$): 60, 50, 75;
- Regime 3($\%FC_3, \%t_3, \%Q_3$): 54, 25, 50.

3. Caso Base 3: Instalação Fortemente Sobredimensionada

- Aplicação: Ventilador Centrífugo;
- Método de Controlo: Pás de Entrada;
- Regime 1($\%FC_1, \%t_1, \%Q_1$): 67, 25, 70;
- Regime 2($\%FC_2, \%t_2, \%Q_2$): 60, 50, 60;
- Regime 3($\%FC_3, \%t_3, \%Q_3$): 56, 25, 30.

Custo de investimento em Função da potência Nominal

Começa-se por analisar o custo de investimento da medida em função da potência nominal do VEV a instalar, cuja evolução aparenta ser aproximadamente linear, como se observa na figura 4.21.

Preço por Kilowatt (€/kW)

Na figura 4.22 é possível observar, de forma semelhante ao constatado no modelo de MAR, os valores de custo de implementação por *kilowatt* são cada vez mais elevados à medida que se consideram potências nominais abaixo de 30kW.

O custo da solução por *kilowatt* para potências superiores a 50kW mantém-se aproximadamente constante.

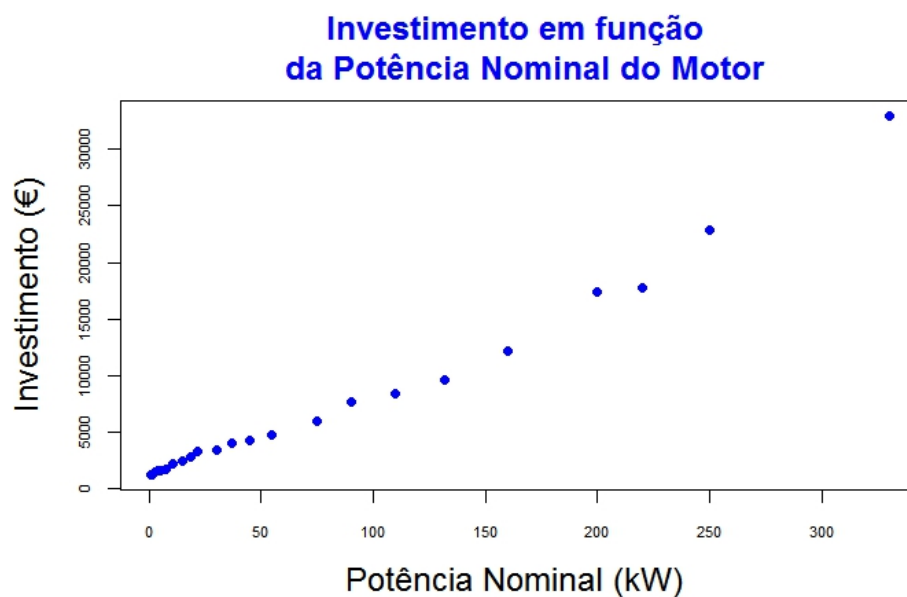


Figura 4.21: Custo de investimento em função da potência nominal do VEV a instalar.

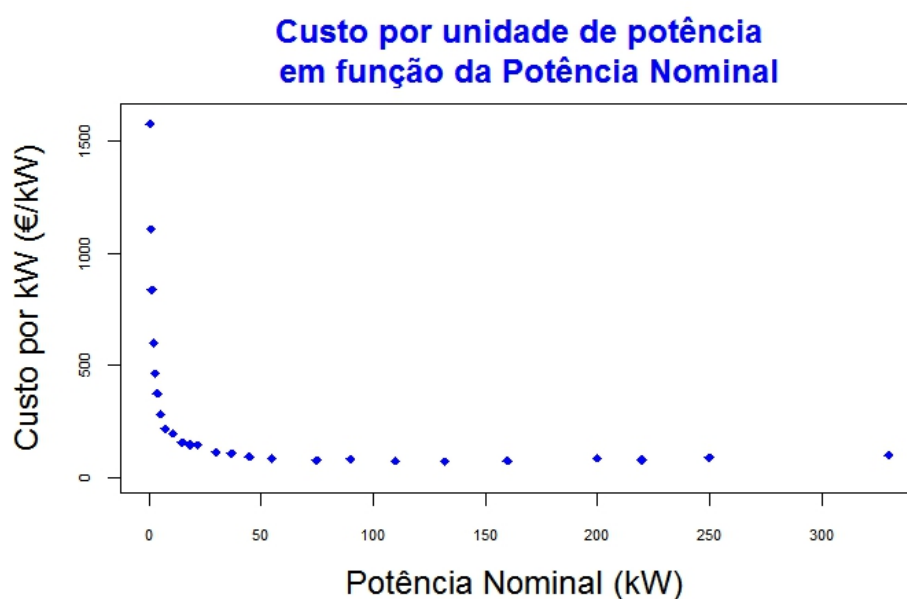


Figura 4.22: Custo da implementação da medida por *kilowatt* (€/kW).

Consumo na Situação atual em função do Tempo de Operação Anual (kWh)

Observa-se o consumo do sistema na situação atual para o caso base 1, representando uma instalação normalmente dimensionada segundo [26], para diferentes tempos de operação anual.

Repare-se que na imagem 4.23, é possível distinguir, considerando apenas um tempo

de operação em particular, os resultados de simulação para os diferentes cenários dimensionados para a instalação.

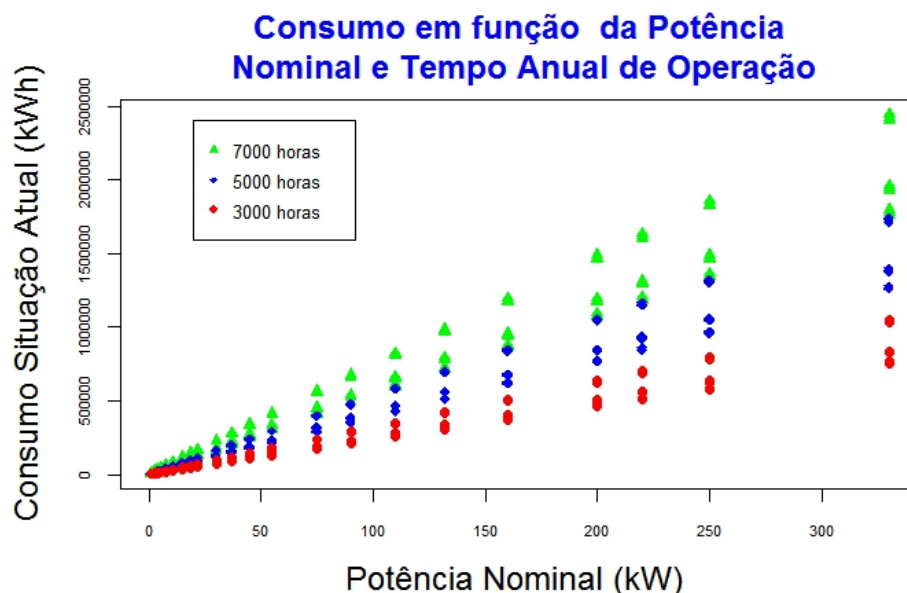


Figura 4.23: Consumo energético em função do tempo de operação anual na situação atual (são representadas as simulações para o caso base 1.)

Consumo economizado em função da Potência Nominal (kWh)

É possível inferir, através da observação dos resultados de simulação, que para baixas potências ($P_{nominal} \leq 30kW$), as poupanças energéticas relativas apresentam valores indicadores de maior potencial. Isto também se deve ao facto, de motores de baixa potência nominal, possuírem eficiências menores, implicando assim maiores consumos relativos, e portanto maior potencial de poupança energética relativa.

Em sistemas com motores acima de 50kW, as economias adjacentes (normalizadas à potencia nominal do VEV instalado), mantêm-se aproximadamente constantes. Veja-se, pela imagem 4.24, que a diferença de eficiência para motores de médio/alto calibre pouco variam.

Analisando os resultados relativamente ao dimensionamento da instalação destacam-se claramente instalações cujo sistema de ventilação se encontra fortemente sobredimensionado. Este potencial de poupança é explicado atentando ao facto de que instalações nesta situação, trabalham com caudais bastante abaixo do nominal. Desta maneira, para que seja possível trabalhar debitando caudais inferiores aos nominais, é frequente recorrer às técnicas de estrangulamento mecânico já estudadas, que como se viu na secção 2.4.5, se tornam cada vez menos eficientes à medida que se reduz o caudal.

Pelo contrário, instalações cujo motor se encontra sobredimensionado, trabalhando a

4.5. ANÁLISE AO MODELO E VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE INDICADORES RELEVANTES

fatores de carga menores, mostra uma diminuição no potencial de economias energéticas relativamente ao caso em que a instalação se encontra normalmente dimensionada. Veja-se que o motor se encontrando sobredimensionado, indicia um sistema de ventilação que exige dele potências menores. Sendo menos consumidor, apresenta potenciais de poupança energética menores.

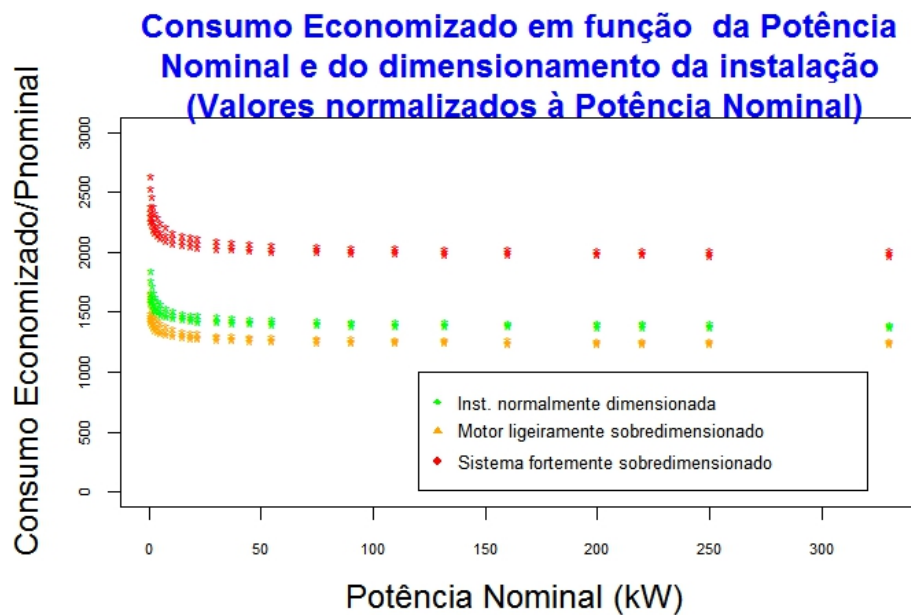


Figura 4.24: Consumo economizado, normalizado à potência nominal do VEV, para os três cenários de dimensionamento estudados.

Tempo de Retorno de investimento em função das horas de operação (anos)

É possível inferir pela imagem 4.25, que o investimento em variação eletrónica de velocidade se torna pouco interessante para potências perto dos 0,75kW.

Considerando como tempo médio de vida de um VEV cerca de 15 anos é pertinente que se meta em causa a viabilidade deste tipo de investimento para aplicações muito abaixo de 5kW. Esta tendência é também explicada atentando aos valores do custo por *kilowatt*, que mostram substancialmente superiores para implementações de medidas VEV de baixa potência.

Para aplicações de média/alta potência, este tipo de solução, nos cenários descritos, relativamente ao caso base 1, apresenta um bom potencial de investimento, apresentando tempos de retorno de investimento substancialmente inferiores a 5 anos. Mesmo para tempos de operação anual rondando as 3000 horas/ano.

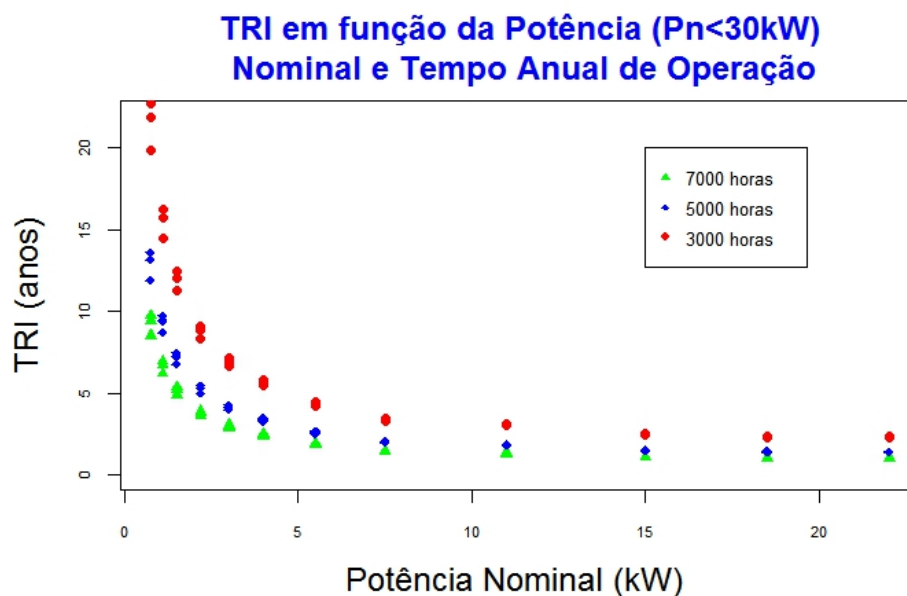


Figura 4.25: Tempo de retorno de investimento para potências nominais menores que 30kW em função do tempo de operação anual.

Tempo de Retorno de investimento em função do dimensionamento da instalação ($P_n < 30\text{ kW}$)

Atentando aos resultados obtidos, na figura 4.26, relativamente ao TRI na implementação de tecnologia VEV, para equipamentos de potência nominal inferior a 30kW, é possível tirar ilações acerca da influência do estado de dimensionamento dos componentes presentes na instalação. Repare-se que para a presente caracterização, em instalações de pequena potência, o estado de dimensionamento pode constituir um fator decisivo na viabilidade do investimento.

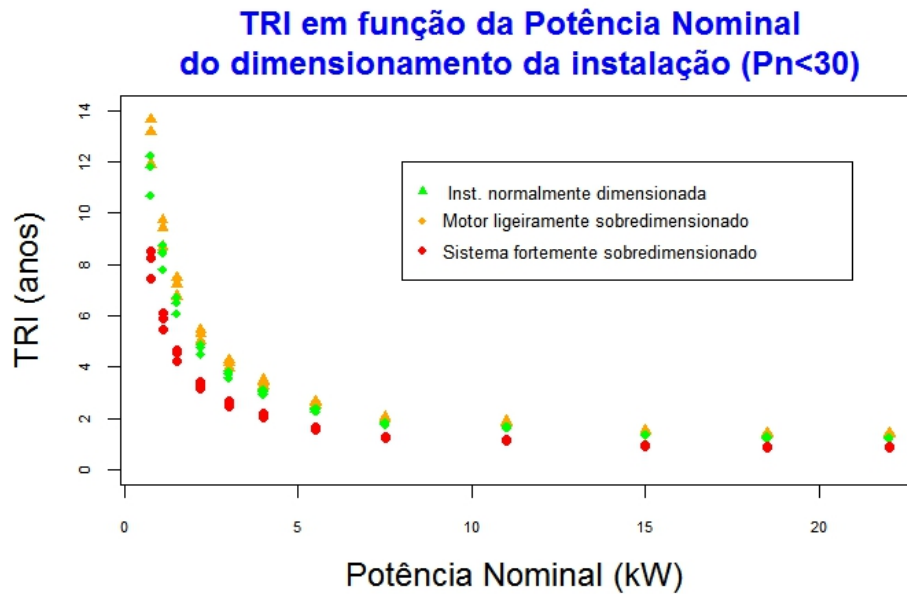


Figura 4.26: Tempo de retorno de investimento em função do estado do dimensionamento das componentes de instalação, para potências nominais inferiores a 30kW.

Tempo de Retorno de investimento em função do dimensionamento da instalação ($P_n > 30$ kW)

Observando os resultados da imagem 4.27, relativos ao tempo de retorno de investimento para potências acima de 30kW, é possível concluir, em primeiro lugar acerca do elevado potencial de implementação desta medida, sendo possível atingir TRI's inferiores a um ano.

Em segundo lugar, os dados corroboram a tese de que sistemas sobredimensionados apresentam um índice de viabilidade substancialmente maior. Pelo contrário, instalações acionadas por um motor com potência nominal acima do exigido apresentam *paybacks* superiores.

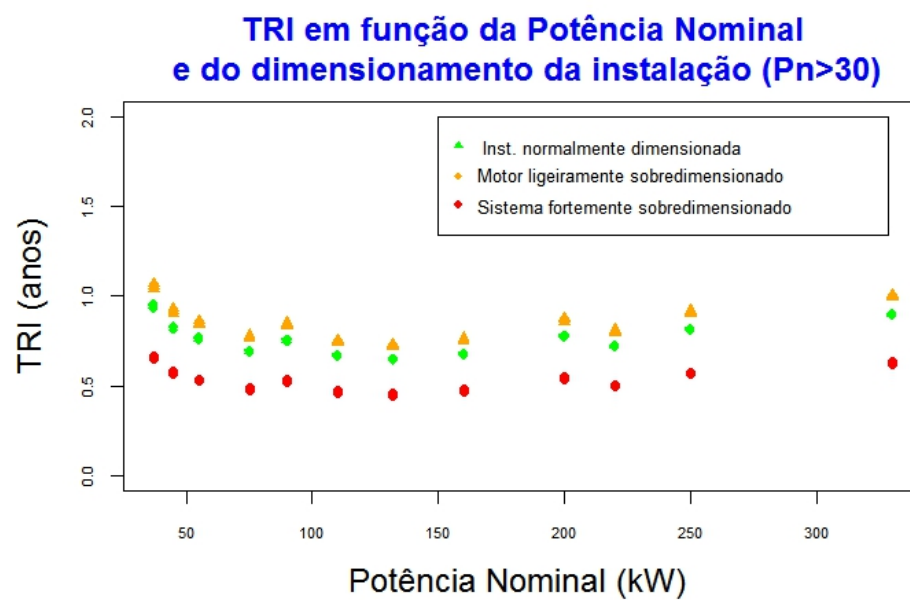


Figura 4.27: Tempo de retorno de investimento em função do estado do dimensionamento das componentes de instalação, para potências nominais superiores a 30kW.

CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo, pretende-se apresentar simulações de ambas as ferramentas. Para o efeito, tira-se partido de casos reais de auditorias energéticas realizadas no âmbito de PPEC's anteriores.

Como nem toda a informação é detalhada nestes relatórios, no caso da ferramenta de VEV são realizadas algumas adaptações para que se proceda à simulação.

Por melhor servirem o propósito desta simulação, e devido à forma como se apresenta a informação nos relatórios, as simulações são feitas nas ferramentas MAR simplificada e VEV detalhada.

Também devido à forma como é apresentada a informação nos relatórios, de forma demasiado resumida ou sob forma de valores médios, testa-se a ferramenta VEV apenas com um regime de carga/caudal. Como a informação acerca dos caudais, métodos de controlo e estrangulamento não é apresentada, assumem-se aquelas cujo benefício económico se apresenta de forma mais conservadora. Assumem-se para os sistemas de ventilação caudais médios de 90% e em bombagem 85%.

Nos relatórios de M&V referentes a VEV, é possível observar a energia que se estima poupar com a implementação das medidas, assim como os benefícios diretos a nível financeiro e *payback* simples, sendo assim possível compará-los com os resultados finais das ferramentas.

Além de se mostrarem, para cada situação os dados de *input* e *output* das ferramentas, mostram-se ainda valores intermédios presentes no modelo.

5.1 Simulação e Análise de Resultados: MAR

Na tabela 5.1 é possível observar os resultados de diferentes relatórios de auditoria energética para otimização da utilização de energia elétrica em sistemas de força motriz. Mantêm-se as empresas incógnitas.

Repare-se que à data da avaliação proposta era contemplada a substituição por motores de classe de eficiência IE2.

Tabela 5.1: Dados de M&V retirados de um conjunto de relatórios de auditorias energéticas, considerando a implementação de medidas MAR.

Referência	Potência do Motor [kW]	Horas de Operação [h/ano]	Fator de Carga [%]	Rendimento IE2 [%]	Rendimento Standard [%]	Economias [kWh/ano]	Economia Estimada [€/ano]
Bomba circulação	45	5000	80,0	94,2	90,0	8.917	526
Ventilador	30	4160	64,0	91,9	88,0	5.693	330
Bomba de água gliconada	18,5	4160	67,6	91,9	88,0	2511	146
Espremedor	29,4	4160	93,6	93,9	88,0	8.337	484
Lavadora (Bomba)	15	4160	51,4	91,9	88,0	1.548	90
Bomba de Vácuo GL22	15	4000	35	91,9	88,0	1.013	91,1
Ventilador 100-02	18,5	4000	50	91,9	88,0	1.784	160,6
Ventilador 100-03	7,5	4000	42	89,9	84,0	984	88,6

Na figura 5.1, é possível observar os dados de *input* em folha de cálculo inseridos para efeito de simulação da ferramenta MAR simplificada.

Consideram-se os motores auditados como classe EFF3, excetuando o da Bomba de Vácuo GL22, cuja classe de eficiência é especificada no relatório. O número de polos é sempre especificado nos relatórios.

Nº motor	Descrição	Potência Nominal (kW)	Classe de Eficiência	Velocidade Nominal (rpm)	Horas de funcionamento	Fator de carga (%)
1	Bomba Circulação	45	Eff3	1000	5000	80
2	Ventilador	30	Eff3	1000	4160	64
3	B. Água gliconada	18,5	Eff3	1500	4160	67,6
4	Espremedor	30	Eff3	1000	4160	93,6
5	Bomba da Lavadora	15	Eff3	1500	4160	51,4
6	Bomba Vácuo GL22	15	IE1	1000	4000	35
7	Ventilador do Arrefecedor	18,5	Eff3	1500	4000	50
8	Vent. Recirculação	7,5	Eff3	1500	4000	42

Figura 5.1: Tabela "Input" na ferramenta MAR Simples.

Na figura 5.2, além de se repetirem alguns parâmetros de entrada para contextualização, apresenta-se o rendimento nominal considerado com base na curvas IEC (sexta coluna) e o fator de degradação a aplicar (décima coluna), que é aqui sempre igual a 1, pois o fator de carga nos motores é nunca inferior a 30%. É também apresentado o valor da potência elétrica média consumida, assim como a energia consumida anualmente.

Na figura 5.3 é apresentada na primeira coluna a marca dos motores de alto rendimento e na seguinte, a referência do produto. Na terceira coluna apresenta-se a estimativa para o novo consumo. Nas duas últimas colunas é possível observar o consumo energético economizado anualmente e as poupanças estimadas em €/ano.

5.1. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS: MAR

Nº motor	Referência/ Descrição	Potência Nominal (kW)	Nº Polos	Classe de Eficiência	Rendimento Nominal (%)	Horas funcionamento / ano	Fator de Carga (%)	DgrMar	Dgr	η estimado (%)	P. elétrica (kW)	Energia /ano (kWh)
1	Bomba Circulação	45	6	EF3	89,84	5000	80	1	1	89,8	40,1	200361,2
2	Ventilador	30	6	EF3	88,48	4160	64	1	1	88,5	21,7	90268,7
3	B. Água gliconada	18,5	4	EF3	87,48	4160	67,6	1	1	87,5	14,3	53470,2
4	Espremedor	30	6	EF3	88,48	4160	93,6	1	1	88,5	31,7	132017,9
5	Bomba da Lavadora	15	4	EF3	86,70	4160	51,4	1	1	86,7	8,9	36932,2
6	Bomba Vácuo GL22	15	6	IE1	87,75	4000	35	1	1	87,7	6,0	23932,8
7	Ventilador do Arrefecedor	18,5	4	EF3	87,48	4000	50	1	1	87,5	10,6	42295,0
8	Vent. Recirculação	7,5	4	EF3	83,71	4000	42	1	1	83,7	3,8	15052,7

Figura 5.2: Tabela "Modelo" na ferramenta MAR Simples.

Marca	Referência	Consumo (kWh)	Potência Nominal (kW)	η MAR (%)	Custo Investimento (I)	FC1 (%)	Consumo economizado (kWh/ano)	Poupanças(I/ano)
WEG	√22 280S/M 45-6P-B	189473,7	45	95	5843,81	80	10887,6	642,4
WEG	√22 225S/M 30-6P-B	84970,2	30	94	3587,66	64	5298,5	307,3
WEG	W22 180M 18,5-4P-B	56061,4	18,5	92,8	1755,03	67,6	3408,8	197,7
WEG	√22 225S/M 30-6P-B	124268,9	30	94	3587,66	93,6	7749,0	449,4
WEG	W22 160L 15-4P-B3	34749,3	15	92,3	1332,05	51,4	2242,9	130,1
WEG	W22 160L 15-6P-B3	22826,1	15	92	1750,81	35	1106,7	99,6
WEG	W22 180M 18,5-4P-B	39870,7	18,5	92,8	1755,03	50	2424,4	218,2
WEG	W22 132M 7,5-4P-B3	13907,3	7,5	90,6	1066,7	42	1145,4	103,1

Figura 5.3: Tabela "Output" na ferramenta MAR Simples.

Na figura 5.4 apresentam-se os dados relativos à saída do modelo.

Nº motor	Marca recomendada		WEG
	Investimento (€)	Poupanças (€/ano)	Payback (anos)
1	5844	642	9,1
2	3588	307	11,7
3	1755	198	8,9
4	3588	449	8,0
5	1332	130	10,2
6	1751	100	17,6
7	1755	218	8,0
8	1067	103	10,3

Figura 5.4: Tabela de "SaídaModelo" na ferramenta MAR Simples.

Repare-se que o modelo considera a substituição por motores de classe de eficiência IE3, sendo portanto natural que as economias esperadas venham um tanto superiores. Isto só não se verifica em relação ao motor nº 2, visto que o valor atribuído pelo auditor como rendimento standard é menor do que o considerado na ferramenta, e o rendimento IE2 é um pouco otimista. O mesmo acontece com o motor nº 3.

Atentando aos resultados, a ferramenta mostra cumprir o seu propósito estando em linha com valores esperados, ainda que se teste na sua versão simplificada.

5.2 Simulação e Análise de Resultados: VEV

Na tabela 5.2, mostram-se resultados de auditoria energética retirados de relatórios de edições do PPEC transatas.

Tabela 5.2: Dados de M&V retirados de um conjunto de relatórios de auditorias energéticas, considerando a implementação de medidas VEV.

Referência	Preço Energia [€/kWh]	Potência do Motor [kW]	Potência média tomada [kW]	Horas de Operação [h/ano]	Fator de Carga [%]	Consumo Atual [kWh]	Economias [kWh/ano]	Economia Estimada [€/ano]	Payback simples [anos]
Bomba B613	0,059	160	123	5000	71	614813	92222	5441	2,4
Bomba de Circulação	0,059	45	41	5000	82	204896	40979	2418	2,7
Bomba de Vácuo BV601	0,059	160	102,2	5000	59	510947	51095	3015	4,4
Bomba de Vácuo BV503	0,059	160	116,7	5000	68	583338	58334	3442	3,8
Ventilador B4	0,058	30	23,9	4160	70,6	99288	99288	1728	2,8
Bomba de Vácuo GL22	0,09	15	5,1	4000	35	20454	6136	552	6
Ventilador Despoeiramento	0,09	37	31,4	4000	77,4	125518	25104	2259	2,4
Ventilador Café Verde	0,09	22	17,4	4000	70,5	69507	13901	1251	3,4
Ventilador do Arrefecedor	0,09	18,5	4,8	4000	23	19314	4828	435	8,4
Ventilador recirculação de ar	0,09	7,5	3,8	4000	43	15122	3780	340	7,5
Bomba de circulação 3	0,082	37	31,5	7200	77,6	226858	22686	3583	3,0
B. Torre Pequena	0,082	11	9,4	4000	74,9	37769	11331	929	4,6
B. Circulação Termofluido	0,082	30	18,7	6000	56,5	111912	22382	1835	2,6
Misturadora Tanque Equalização	0,082	7,5	4	4000	46	15924	3185	261	9,7
Soprador Blindado 01K9V07	0,058	132	40,5	5000	30,1	202588	40518	2333	5,1
Elevador 11J9V06	0,058	110	73,8	4000	62,6	295223	59045	3399	2,8

Na figura 5.5, apresentam-se os dados de entrada considerados para a ferramenta e que se sujeitam à análise da viabilidade técnico-económica na implementação de variação eletrónica de velocidade, na sua versão detalhada. Consideram-se todos os motores como de classe de eficiência IE1. Devido à forma como são apresentados os relatórios de auditoria, para efeitos de simulação considera-se apenas um regime. Como não são apresentados nos relatórios os valores para os caudais, e por serem valores que traduzem a forma de cálculo de poupanças dos auditores, considera-se que a aplicação trabalha a 90% do caudal nominal no caso da ventilação e 85% no caso das aplicações de bombagem. Veja-se que, do lado do auditor existe sempre preocupação em que os resultados não se traduzam em economias estimadas muito maiores do que as que serão obtidas na realidade.

Tomam-se em ambos os casos, por assunção, como método de controlo aquele que um mais modesto benefício a nível de poupança energética permite aquando a aplicação de variação eletrónica de velocidade.

Na figura 5.6, é possível observar alguns dados internos do modelo relativos à caracterização do cenário atual. Na terceira coluna é possível observar o tipo de binário considerado (que depende do tipo de aplicação).

Ainda na figura 5.6, na décima coluna, onde se vê “%Consumo”, é apresentado o valor considerado que o sistema consome em relação ao que consumiria trabalhando ao caudal nominal.

5.2. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS: VEV

Nº motor	Descrição	Potência Nominal (kW)*	Classe de Eficiência*	Velocidade Nominal (rpm)*	Horas de funcionamento / ano*	Aplicação	Sistema de Estrangulamento/Controle de fluxo	Fator de carga1 (%)*	tempo1 (%)	caudal atual necessário ou Velocidade necessária1
1	Bomba B613	160	IE1	1500	5000	Bomba centrífuga	trngulamento (c/elevaçã	71,0	100,0	85,0
2	Bomba de Circulação	45	IE1	1000	5000	Bomba centrífuga	trngulamento (c/elevaçã	82,0	100,0	85,0
3	Bomba de Vácuo 601	160	IE1	1000	5000	Outra	Não	59,0	100,0	90,0
4	Bomba de Vácuo 503	160	IE1	1000	5000	Outra	Não	68,0	100,0	90,0
5	Ventilador B3	30	IE1	1000	4160	Ventilador centrífugo	Pás entrada	70,6	100,0	90,0
6	Bomba de Vácuo GL22	15	IE1	1000	4000	Outra	Não	35,0	100,0	90,0
7	Ventilador Despoeiramento	37	IE1	3000	4000	Ventilador centrífugo	Pás entrada	77,4	100,0	90,0
8	Ventilador Café Verde	22	IE1	1500	4000	Ventilador centrífugo	Pás entrada	70,5	100,0	90,0
9	Ventilador do arrefecedor	18,5	IE1	1500	4000	Ventilador centrífugo	Pás entrada	23,0	100,0	90,0
10	entilador de recirculação de a	7,5	IE1	1500	4000	Ventilador centrífugo	Pás entrada	43,0	100,0	90,0
11	Bomba de circulação 3	37	IE1	1500	7200	Bomba centrífuga	trngulamento (c/elevaçã	77,6	100,0	85,0
12	Bomba torre pequena	11	IE1	1500	4000	Bomba centrífuga	trngulamento (c/elevaçã	74,9	100,0	85,0
13	Bomba circ. Termofluido	30	IE1	3000	6000	Bomba centrífuga	trngulamento (c/elevaçã	56,5	100,0	85,0
14	listuradora Tanque Equalizad	7,5	IE1	1500	4000	Misturadora	Não	46,0	100,0	90,0
15	Soprador Blindado OIK9V07	132	IE1	1500	5000	Soprador centrífugo	Pás entrada	30,1	100,0	90,0
16	Elevador 11J9U06	110	IE1	1500	4000	Elevador	Não	62,6	100,0	90,0

Figura 5.5: Tabela de "Inputs" na ferramenta VEV detalhado.

Na última coluna da figura 5.6, observam-se os valores de rendimento do motor considerados para efeito de cálculo. Repare-se na linha relativa ao motor nº 9, que trabalha a 23% do fator de carga é aplicado um fator de degradação ao rendimento.

Nº motor	Referência/ Descrição	Tipo de Binário	Potência	Nº Polos	Rendimento	Classe	Horas	P.elétrica1 (kW)	% consumo	Energia1/ano (kWh)	n1 (%)
1	Bomba B613	Binário Quadrático	160	4	93,8	IE1	5000	121,13	96,15	605673	93,8
2	Bomba de Circulação	Binário Quadrático	45	6	91,4	IE1	5000	40,38	96,15	201891	91,4
3	Bomba de Vácuo 601	Binário Constante	160	6	93,8	IE1	5000	100,66	100	503292	93,8
4	Bomba de Vácuo 503	Binário Constante	160	6	93,8	IE1	5000	116,01	100	580065	93,8
5	Ventilador B3	Binário Quadrático	30	6	90,2	IE1	4160	23,48	104,92	97666	90,2
6	Bomba de Vácuo GL22	Binário Constante	15	6	87,7	IE1	4000	5,98	100	23932	87,7
7	Ventilador Despoeiramento	Binário Quadrático	37	2	91,2	IE1	4000	31,39	104,92	125561	91,2
8	Ventilador Café Verde	Binário Quadrático	22	4	89,9	IE1	4000	17,26	104,92	69036	89,8
9	Ventilador do arrefecedor	Binário Quadrático	18,5	4	89,3	IE1	4000	5,03	104,92	20118	84,6
10	entilador de recirculação de e	Binário Quadrático	7,5	4	86,0	IE1	4000	3,75	104,92	14992	86
11	Bomba de Circulação 3	Binário Quadrático	37	4	91,2	IE1	7200	31,47	96,15	226595	91,2
12	Bomba torre pequena	Binário Quadrático	11	4	87,6	IE1	4000	9,41	96,15	37639	87,6
13	Bomba de circ. Termofluido	Binário Quadrático	30	2	90,7	IE1	6000	18,69	96,15	112110	90,7
14	listuradora tanque equalizad	Binário Linear	7,5	4	86,0	IE1	4000	4	100	16038	86
15	Soprador Blindado OIK9V07	Binário Quadrático	132	4	93,5	IE1	5000	42,47	104,9	212389	93,5
16	Elevador 11J9V06	Binário Constante	110	4	93,3	IE1	4000	73,82	100	295275	93,3

Figura 5.6: Tabela de "Modelo" na ferramenta VEV detalhado.

Na figura 5.7 observam-se (excetuando a primeira coluna), valores do modelo relacionados com a caracterização do cenário futuro.

Na figura 5.8 é possível observar o resultado com a seleção da marca recomendada (a que menor tempo de retorno do investimento traz para o cliente).

Desde logo é possível observar, comparando os resultados de M&V e da ferramenta, que os desta última apresentam regra geral tempos de retorno de investimento ligeiramente inferiores. Por inspeção, é possível concluir que a discrepância observada nos *paybacks* se devem aos diferentes valores de investimento considerados pelos auditores e os presentes nas base de dados de fornecimento e instalação da ferramenta.

É possível também constatar que em aplicações de binário constante a ferramenta toma uma posição conservadora em relação aos benefícios, nunca no entanto, falhando por excesso (considerou-se 10% de economia estipulada).

Apesar das adaptações realizadas para permitir a sua simulação, os resultados são concordantes com os obtidos em auditoria, sendo assim possível sustentar a validade do modelo na medida em que reproduz de forma coerente os resultados de auditoria.

Consumo Atual Total	Potência VEV	Consumo Optimizado	Consumo eco	Poupanças1 (€/ano)
605673	98,15	490726	114948	6782
201891	32,72	163576	38316	2261
503292	91,10	455479	47813	2821
580065	104,99	524959	55106	3251
97666	18,74	77947	19719	1144
23932	5,41	21659	2274	205
125561	25,05	100210	25352	2282
69036	13,77	55098	13939	1255
20119	4,01	16057	4062	366
14993	2,99	11965	3027	272
226595	25,50	183591	43005	3526
37634	7,62	30491	7142	586
112110	15,14	90833	21277	1745
16039	3,53	14111	1928	158
212389	33,9	169507	42883	2487
295275	66,81	267224	28051	16261

Figura 5.7: Tabela de "Modelo" na ferramenta VEV detalhado.

Marca recomendada		Omron
Investimento (€)	Poupanças (€/ano)	Payback (anos)
12196	6781	1,8
4242	2260	1,9
12196	2820	4,3
12196	3251	3,8
3444	1143	3,0
2376	204	11,6
4015	2281	1,8
3221	1254	2,6
2736	365	7,5
1639	272	6,0
4015	3526	1,1
2172	585	3,7
3444	1744	2,0
1639	158	10,4
9627	2487	3,9
8325	1626	5,1

Figura 5.8: Tabela de "SaídaModelo" na ferramenta VEV detalhado.

CONCLUSÕES

O presente capítulo apresenta as principais conclusões extraídas a partir do trabalho desenvolvido na presente dissertação. É feito de modo sumário o comentário aos temas abordados, assim como discutidos os resultados obtidos.

São reveladas também, algumas recomendações para possíveis trabalhos futuros.

6.1 Principais Aspetos, Conclusões e Síntese de Resultados

O presente trabalho tem como foco o desenvolvimento de quatro simuladores de apoio à decisão na implementação de medidas de eficiência energética: dois relativos à substituição de motores de rendimento padrão ou ineficientes, por motores de eficiência premium (MAR), os outros dois relativos à aplicação de variação eletrónica de velocidade em sistemas eletromotrizes (VEV).

Durante o trabalho são diversos os pontos abordados e estudados que se apresentaram como alicerces para o desenvolvimento dos simuladores e dos modelos que lhes servem como base, quer a nível técnico, a nível mercado ou legislativo.

No trabalho introduz-se o motor de indução trifásico, onde se destacam as equações 2.17 e as inferidas através do esquema de *Steinmetz*, pela importância no contexto da variação de velocidade em sistemas motrizes, e como recurso para simulação computacional.

É feita referência aos métodos de arranque mais utilizados na indústria, já que a aplicação do VEV implica a sua retirada de funcionamento. Evidenciam-se as vantagens técnicas de utilização do VEV em relação aos restantes métodos nomeadamente:

- No controlo de binário e velocidade;
- Na preservação das eficiências das engrenagens e correias;

- No controlo da corrente de arranque (função *soft-starting* e *soft-stop*);
- Possibilita a melhoria do fator de potência em regime permanente (tendo em conta que a injeção de conteúdo harmónico se tornou menos relevante nos últimos anos, que para a rede que para a máquina).

Abordam-se e definem-se as características de serviço referentes a motores de indução trifásicos, com interesse na nomeação de características que possibilitam restringir o conjunto de motores lançados a consulta de mercado para posterior integração na base de dados de produto nas ferramentas.

No capítulo 2.2, O Motor de Alto Rendimento, pretende-se realçar as principais características diferenciadoras de um MAR, isto é, as estratégias de conceção utilizadas visando a otimização da eficiência global da máquina.

É realizada uma reportagem cronológica da evolução a nível legislativo, relativamente às normas referentes a máquinas elétricas rotativas. Fala-se da importância da regulação do mercado de motores e do papel das normas tendo estas:

- Aumentado a facilidade do acesso à informação por parte do cliente final, nomeadamente através das classes de eficiência e da harmonização do mercado;
- Aumentando a competitividade entre fabricantes e incentivando-os a investir no aumento da eficiência da máquina;
- Dinamizando o mercado, em sinergia com programas de incentivo ao investimento.

O trabalho no contexto da legislação, contribui com informação referente à atualização de normas decorrentes da diretiva EC nº 4/2014 para os documentos relativos ao processo de *procurement*. O manual [49], da DGEG, publicado em 2016, contém um capítulo onde consta ainda a informação relativa à norma EC nº 640/2009.

Faz-se uma comparação entre as normas IEC referentes a motores e as diretivas europeias adotadas referentes à conceção ecológica de produto. Isto, sem deixar de referir as mudanças previstas na legislação europeia a curto/médio prazo, constituindo interesse relativamente ao próximo PPEC.

A consideração de normas futuras torna-se relevante na conceção dos modelos, e na estrutura das ferramentas, permitindo a futura atualização. São consideradas as potências inferiores a 0,75kW (não em vigor, à data). Na presente dissertação, atualizam-se coeficientes de interpolação aplicáveis às expressões de eficiência presentes na norma IEC [31].

Em futuras atualizações da ferramentas deverá ser equacionada a proposta de soluções com motores de classe IE4 (incluída já no *procurement*).

É realizada também, uma caracterização dos motores no contexto industrial, permitindo, através de dados provenientes da própria indústria, construir uma imagem do panorama das características típicas do motor no meio industrial, sendo possível concluir que:

- Quanto maior a potência nominal, maior a tendência para para que um motor trabalhe um número de horas anuais mais elevadas;
- Quanto maior a potência nominal, maior a tendência para para que um motor trabalhe com fatores de carga mais elevados;
- Reconhece-se a forte presença de motores de classe IE1 na indústria, ainda que com uma cota substancial de motores IE2;
- Reconhece-se uma maior presença de motores de 4 polos.

Discute-se a possibilidade de inclusão da lógica *downsizing* no modelo, que teoricamente confere vantagens, permitindo que o novo motor trabalhe a um fator de carga mais elevado, e portanto mais próximo da sua eficiência nominal, e com $\cos\varphi$ superior. Na prática, o *downsizing* acarreta algum risco, que tanto a indústria como instaladores, na maioria das vezes, não se encontram dispostos a tomar. Ainda assim, há que ter em conta alguns prós e contras:

- Um motor de maior potência nominal, mesmo que sobredimensionado pode apresentar rendimentos superiores;
- Um sobredimensionamento relevante pode levar à necessidade de compensação do fator de potência;
- Motores de maior potência nominal, apresentam tempos de vida útil superior.

Relativamente à rebobinagem de motores é possível encontrar autores com opiniões discordantes. Retém-se a ideia, no entanto, de que este processo é de facto complexo, e dependendo das condições, pode prejudicar a eficiência do motor até 4%.

A variação de velocidade em sistemas motrizes é abordada com especial interesse. São destacadas as grandezas em relação às quais é possível atuar na máquina:

- Número de pares de polos;
- Escorregamento (variação da resistência rotórica ou da amplitude da tensão de alimentação);
- Frequência de alimentação.

Através de simulações, percebe-se a razão pela qual a variação de velocidade mecânica, recorrendo à manipulação de variação da frequência de alimentação, constitui um método mais versátil e eficaz e eficiente em relação às outras abordagens.

Compreende-se que o tema de variação de velocidade não é de todo indissociável à relação motor-carga. Se se aborda a forma como as grandezas elétricas (tensão, frequência) são, ainda que de forma diferente, usadas para afetar o funcionamento da máquina, os diferentes tipos de carga apresentam pelas suas características mecânicas, um comportamento que depende da grandeza em estudo - a velocidade.

São estudados vários tipos de cargas e a forma como o seu comportamento varia em função da velocidade. Através da natureza da carga, torna-se possível abordar o problema, setorizando as aplicações industriais mais comuns, em função da natureza da sua carga.

Através de simulação, obtém-se curvas características teóricas para cada tipo de carga. Simultaneamente, mostram-se curvas binário-velocidade obtidas *in situ*, isto é, pela medição em aplicações reais, validando desta forma a estratégia de setorização.

Esta abordagem, onde se procede à classificação dos vários tipos de aplicação, pelo comportamento da sua carga mecânica, permite compreender as diferenças que se apresentam no potencial de redução de consumo no contexto da aplicação de variação eletrónica de velocidade.

Procura-se compreender, na secção 2.4.5, através do estudo de algumas aplicações industriais, em particular:

- Porque é dada primazia de investimento às aplicações de bombagem e ventilação em detrimento de outras;
- Quais as particularidades e características de cada aplicação que podem constituir *insights* na escolha dos dados de entrada;
- Pretende-se compreender, no contexto das diferentes aplicações, onde e de que forma é possível reduzir consumos ou tornar os sistemas mais eficientes através do controlo de velocidade.

Desta forma, é possível retirar as seguintes ilações:

- Aplicações como bombagem e ventilação são de implementação técnica mais simples e rápida;
- Vê-se que, nas aplicações de moagem, se beneficia da característica versatilidade que a variação eletrónica de velocidade confere, ajustando a cada fase do processo de moagem, a sua ação. No entanto, a otimização do processo de controlo, implica testes no terreno e, por vezes, com diferentes matérias primas;
- Em aplicações com esteiras transportadoras, é por vezes complicado proceder a alterações de velocidade, estando estas integradas num sistema.

O estudo mais aprofundado destas aplicações permite perceber a dificuldade e a maior ou menor complexidade que a caracterização destes sistemas implica, assim como a implementação de variação eletrónica velocidade, sendo estes sistemas, muitas vezes, parte integrante de outros sistemas.

Todas as conclusões retiradas do capítulo 2, para além de se revelarem essenciais à compreensão do tema, influenciam a construção dos modelos integrados nas ferramentas.

Um dos desafios na construção dos modelos assenta na tentativa de os tornar acessíveis, simplificando o uso da ferramenta por parte de utilizadores de cariz não técnico (módulos simplificados), sem no entanto, comprometer a validade do cálculo.

Os regimes variáveis a que os motores estão sujeitos tornam a caracterização, por parte do utilizador, uma tarefa não trivial. No entanto, o fator de carga, muitas vezes utilizado pelos auditores para traduzir o rácio entre a potência mecânica e a potência nominal, permite a caracterização de regimes, sendo esta decisiva na viabilidade da tomada de decisão.

No módulo de motores, para além do fator de carga, recorre-se como elemento chave, à chapa de características. Este elemento tem um papel fundamental, tornando a tarefa de recolha de informação, por parte do cliente, relativamente simples.

Segundo os *insights* recolhidos, o tempo de operação anual é um dado que qualquer cliente fornece com facilidade e boa precisão. É tido em conta no modelo, a característica de degradação do rendimento em função da carga.

É pedida a idade do motor e o número de rebobinagens. Embora a idade do motor possa ser um fator a ter em conta na decisão de investimento, no modelo ele é usado, ainda que com um peso modesto (0,05%/ano), para influenciar a degradação do rendimento. Sugere-se que no futuro este valor seja também usado na análise económica do investimento, permitindo inferir o valor remanescente do ativo que é substituído.

São já incluídos no simulador motores com influência nominal inferior a 0,75kW. De facto, na secção 2.2.1 refere-se que está prevista a sua normalização no contexto das diretivas europeias a curto/médio prazo. Inclui-se na base de dados de motores a recente classe IE4, no entanto, o rácio benefício/custo ainda não excede o dos motores de classe IE3.

No modelo, as expressões presentes nas normas IEC utilizadas para inferir o rendimento da situação atual, foram atualizadas, assim como os respetivos coeficientes de interpolação. Esta atualização afeta, maioritariamente, simulações para motores de baixa potência nominal.

Na secção 4.5, através das simulações efetuadas ao modelo, é possível concluir-se:

- O valor de investimento da medida aumenta de forma aproximadamente linear com a potência nominal;
- Motores de baixa potência apresentam relação preço/kW substancialmente mais elevada;
- Embora o *payback* de baixa potência nominal se verifique menor, em condições semelhantes, o seu tempo de vida útil é considerado de 5 a 15 anos inferior a motores de média/alta potência, o que é relevante para os indicadores económicos do investimento. Note-se que, motores de grande potência têm um tempo de vida útil esperado de 30 anos;
- É possível concluir que, motores de classe IE2 não são bons candidatos à substituição, considerando o tempo de retorno de investimento;
- Motores com tempo de operação inferiores a 4000 horas não constituem bons candidatos à substituição;
- Motores com fatores de carga médio abaixo de 50% não se verificam bons candidatos à implementação da medida.

A versão simplificada da ferramenta MAR exige apenas os *inputs* necessários ao utilizador, para que seja possível efetuar uma simulação com bons resultado. Mais uma vez, ainda que os campos relativos às características da operação sofram uma simplificação, o fator de carga do motor será o dado que o utilizador não técnico terá menos facilidade em fornecer, recomendando-se, sempre que possível, a consulta de documentos de auditorias anteriores. De facto, reconhece-se a caracterização de regimes como o processo que maior transtorno trás ao utilizador. Foram visualizadas, na presente dissertação, excertos de candidaturas às medidas, em que esta dificuldade fica bem patente, principalmente quando realizadas por intervenientes sem competências técnicas na área da engenharia.

No caso da variação eletrónica da velocidade, a importância da correta caracterização dos regimes de funcionamento ganha ainda mais preponderância, reconhecendo-se a sensibilidade do modelo, principalmente em aplicações de binário quadrático. Nestas aplicações, ventilação e bombagem, são considerados os ganhos energéticos que advêm da substituição dos métodos de controlo de caudal clássicos, pela variação eletrónica de velocidade. No entanto, estes ganhos poderão ser ainda maiores se na fase de M&V, se reconhecer oportunidade de redução de caudal, isto é, de velocidade.

Na grande maioria das restantes aplicações, os benefícios geram-se através da otimização de processo e controlo, possibilitado pelo VEV, assim como pela substituição de métodos mecânicos de regulação de velocidade.

A aplicabilidade destas práticas varia de caso para caso, implementando-se no modelo, um valor para os ganhos genéricos em função do tipo de carga e aplicação. De outra forma, seria necessário estudar cada aplicação individualmente.

Na versão simples da ferramenta VEV, são usadas curvas de regime de caudal típicas presentes na literatura. Não obstante a correta conceção do modelo, estas curvas poderão levar a resultados de simulação mais otimistas do que os que poderão ser obtidos na realidade.

No capítulo 5, *Casos de Estudo*, através de resultados de auditoria, é possível inferir que os regimes adotados para o cálculo são conservadores. Numa lógica de engenharia inversa, é possível afirmar que estes tomam sempre, principalmente nas aplicações de ventilação e bombagem, valores nunca inferiores a 80% do caudal nominal, uma abordagem algo conservadora, mas que, no entanto, se compreende.

No processo de validação do modelo, através de visualização gráfica, é possível retirar as seguintes conclusões:

- O custo de investimento cresce de forma aproximadamente linear com a potência nominal;
- O custo por kW é, substancialmente, superior para equipamentos abaixo dos 25kW;
- Instalações sobredimensionadas possuem um maior potencial de poupança energética;
- Instalações, normalmente, dimensionadas, com tempo de operação anual superior a 3000 horas, apresentam *paybacks* superiores a 5 anos;
- A aplicação de variação eletrónica de velocidade em sistemas de potências menor que 5kW apresentam *paybacks* próximos ou mais elevados do que o tempo de vida útil do VEV;
- É notável o potencial da medida para aplicações de potência nominal superior a 15kW;
- O valor de custo da implementação de variação eletrónica de velocidade, para equipamentos de baixa potência nominal, torna o investimento menos atrativo.

Não deixaria de ser interessante observar resultados através de outros indicadores económicos, uma vez que o *payback* não tem em conta o tempo de vida do produto, nem a desvalorização do retorno em função dos tempo.

Relativamente aos casos de estudo simulados, os resultados não comprometem. Dando estes casos de 2013, onde nas propostas é considerada a troca por motor de classe

IE2, é de esperar que os valores obtidos pela ferramenta desenvolvida revelem um maior benefício, quer energético, quer económico.

Note-se na simulação MAR, atingindo um maior tempo de *payback*, um motor de 4000 horas de operação anual, com baixo fator de carga. Pelo contrário, o motor com maior fator de carga apresenta o melhor *payback*, reforçando a importância deste dado.

Tendo em conta o tempo de vida estimado para motores com diferentes potências, é possível afirmar que a implementação da medida é pouco atrativa para baixas potências.

No que aos simuladores VEV diz respeito, os valores de economia energética resultantes apresentam-se bastante similares aos obtidos nas auditorias. Estes apresentam *paybacks* ligeiramente inferiores, que são explicados pela descida do valor de custo dos equipamentos, desde 2013.

Reforça-se que a correção dos resultados de simulação dependerá sempre do correto preenchimento por parte do utilizador, ainda mais se se considerar que o processo de caracterização de regimes de carga é normalmente efetuado em auditoria.

Os simuladores encontram-se em produtivo na plataforma *online: Save to Compete 2.0*.

6.2 Proposta de Trabalhos Futuros

Neste capítulo pretende-se designar algumas propostas, relativamente a trabalhos a considerar futuramente.

Considera-se pertinente o estudo mais aprofundado de aplicações, recorrendo, simultaneamente, a experiência recolhida no terreno, com o objetivo de alargar o espectro de aplicações que é possível caracterizar na ferramenta.

Seria proveitosa a realização de uma ferramenta onde, baseado em alguns pressupostos e nos dados de leitura nos dispositivos analisadores de energia, usados, normalmente, por auditores, fosse possível inferir acerca da viabilidade da implementação dos sistemas, nomeadamente, na aplicação de variação eletrónica de velocidade. Assim, seria possível a caracterização dos sistemas, tendo em conta fatores como a frequência de arranques e paragens em contexto de operação, ou a aquisição de informação precisa, acerca dos regimes de carga. Com tudo isto, e através de algumas informações fornecidas em contexto de auditoria, obter-se-ia automaticamente, através do *upload* dos dados de auditoria, quais os valores de economia energética, financeira e viabilidade do investimento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ERSE. *Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica*. Accessed: 2018-09-21. 2016. URL: <http://www.erse.pt/pt/ppec/ppec17-18/Paginas/default.aspx>.
- [2] J. PAIVA. *Redes de Energia Elétrica*. IST PRESS, 2015. ISBN: 9789728469665.
- [3] A. de Almeida, P. Bertoldi e W. Leonhard. *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*. Springer Berlin Heidelberg, 1997. ISBN: 9783540630685.
- [4] A. Fitzgerald, A. Fitzgerald, C. Kingsley e S. Umans. *Electric Machinery*. McGraw-Hill International Edition. McGraw-Hill, 2003. ISBN: 9780071230100.
- [5] A. Francisco. *Motores Eléctricos*. ETEP, 2013. ISBN: 9789728469665.
- [6] WEG. *Manual de Instalação e Manutenção de Motores Eléctricos de Indução - Trifásicos de Alta e Baixa Tensão*. 2003.
- [7] M. v. Ventim Neves. *Apontamentos da cadeira de Conversão Eletromecânica de Energia*. DEE, FCT-UNL. 2017.
- [8] V. Mehta e R. Mehta. *Principle Of Electrical Machines*. S. Chand Limited, 2002. ISBN: 9788121921916.
- [9] T. Wildi. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. Prentice Hall, 2002. ISBN: 9780130986375.
- [10] B. Guru e H. Hiziroglu. *Electric Machinery and Transformers*. The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering Series. OUP USA, 2000. ISBN: 9780195138900.
- [11] I. Boldea e S. Nasar. *The Induction Machine Handbook*. Electric Power Engineering Series. CRC Press, 2010. ISBN: 9781420042658.
- [12] *Regras Técnicas de Instalações Eléctricas de Baixa Tensão, Decreto-Lei 226/2005, de 28 de Dezembro e Portaria N.º 949-A/2006, de 11 de Setembro*.
- [13] *Apontamentos da cadeira Máquinas Eléctricas, Cap.3 Máquinas de Indução Polifásicas*. IST. 2017. URL: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571254085/SEE-Indu>.
- [14] WEG. *Motores, guia de especificação*. Accessed: 2017-09-30. 2007. URL: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>.

- [15] *Electrical insulation - Thermal evaluation and designation*. International Standard. International Electrotechnical Commission, nov. de 2007.
- [16] *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*. International Standard. International Electrotechnical Commission, 2017.
- [17] R. Saidur. "A review on electrical motors energy use and energy savings". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.3 (2010), pp. 877 –898. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002494>.
- [18] H. Li e R. Curiac. "Motor efficiency, efficiency tolerances and the factors that influence them". Em: *2010 Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*. 2010, pp. 1–6. DOI: [10.1109/PCIC.2010.5666829](https://doi.org/10.1109/PCIC.2010.5666829).
- [19] C. J. Verucchi, R. Ruschetti e G. Kazlauskas. "High Efficiency Electric Motors: Economic and Energy Advantages". Em: *IEEE Latin America Transactions* 11.6 (2013), pp. 1325–1331. ISSN: 1548-0992. DOI: [10.1109/TLA.2013.6710379](https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6710379).
- [20] A Zabardast e H Mokhtari. "Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving". Em: *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*. IEEE. 2008, pp. 533–538.
- [21] M. Enokizono. "Vector magnetic characteristic technology for development of super premium efficiency (IE4 level) motor". Em: *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference*. 2011, pp. 632–638. DOI: [10.1109/ACEMP.2011.6490673](https://doi.org/10.1109/ACEMP.2011.6490673).
- [22] H. Gavrilă, V. M. (Paltanea), G. Paltanea, G. Scutaru e I. Peter. "New Trends in Energy Efficient Electrical Machines". Em: *Procedia Engineering* 181 (2017). 10th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2016, 6-7 October 2016, Tirgu Mures, Romania, pp. 568 –574. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.435>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817310196>.
- [23] V Manescu, G Paltanea, H Gavrilă e G. Scutaru. "The effect of mechanical and electrical discharge cutting technologies on the magnetic properties of non-oriented silicon iron steels". Em: *Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. Et Energ.* 60.1 (2015), pp. 59–68.
- [24] V. Manescu, G. Paltanea, H. Gavrilă, G. Scutaru e I. Peters. "High efficiency electrical motors state of the art and challenges". Em: *Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. et Energ.* 62.1 (2017), pp. 14–18.
- [25] *DIRETIVA 2009/125/CE. Requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia*. Ecodesign Directive. União Europeia, 2009.

-
- [26] A Almeida, H. Falkner, J. Fong e K. Jugdoyal. “EuP Lot 30: Electric Motors and Drives”. Em: *Draft Version 2* (2012).
- [27] M. van Werkhoven, R. Werle, C. U. Brunner, S. Jeffcott, J. Tait e D. Martin. *4E: Energy efficiency roadmap for electric motors and motor systems*. Rel. téc. Roadmap, International Energy Agency, 2015.
- [28] J. F. Fuchsloch, W. R. Finley e R. W. Walter. “The Next Generation Motor”. Em: *IEEE Industry Applications Magazine* 14.1 (2008), pp. 37–43. ISSN: 1077-2618. DOI: [10.1109/MIA.2007.909803](https://doi.org/10.1109/MIA.2007.909803).
- [29] *Execução à Directiva 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no que respeita aos requisitos de concepção ecológica para os motores eléctricos*. Ecodesign Directive. União Europeia, jul. de 2009.
- [30] *DIRETIVA (UE) N.º 4/2014. Execução à Directiva 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no que respeita aos requisitos de concepção ecológica para os motores eléctricos*. Ecodesign Directive. União Europeia, jan. de 2009.
- [31] *Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*. International Standard. International Electrotechnical Commission, mar. de 2019.
- [32] A. T. de Almeida, J. Fong, H. Falkner e P. Bertoldi. “Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017), pp. 1275–1286. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117301223>.
- [33] A. T. de Almeida, J. Fong, H. Falkner e P. Bertoldi. “Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74.C (2017), pp. 1275–1286. URL: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:rensus:v:74:y:2017:i:c:p:1275-1286>.
- [34] C. U. Brunner, R. Werle, M. van Werkhoven, J. Fong, A. T. de Almeida e I. Energy. “New technology needs new policy-From component to systems”. Em: (2017).
- [35] A. T. De Almeida, F. Ferreira, J. Fong e P. Fonseca. “EUP Lot 11 Motors”. Em: *Technical Study for Ecodesign Directive, mandated by European Commission, Coimbra Portugal, April* (2008).
- [36] A. T. de Almeida, P. Fonseca, H. Falkner e P. Bertoldi. “Market transformation of energy-efficient motor technologies in the EU”. Em: *Energy Policy* 31.6 (2003), pp. 563–575.
- [37] A. T. de Almeida, P. Fonseca e P. Bertoldi. “Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies”. Em: *Energy* 28.7 (2003), pp. 673–690.

- [38] F. J. Ferreira e A. T. De Almeida. "Induction motor downsizing as a low-cost strategy to save energy". Em: *Journal of Cleaner Production* 24 (2012), pp. 117–131.
- [39] F. J. Ferreira, M. Cisneros-González e A. T. de Almeida. "Technical and economic considerations on induction motor oversizing". Em: *Energy Efficiency* 9.1 (2016), pp. 1–25.
- [40] R. Werle. "Swiss audit program 'Easy'". Em: *Presentation Slides, Motor Summit 2014*. 2014.
- [41] F. J. Ferreira e A. T. de Almeida. "Method for in-field evaluation of the stator winding connection of three-phase induction motors to maximize efficiency and power factor". Em: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21.2 (2006), pp. 370–379.
- [42] A. Chausovsky. "Motor Market Update". Em: *Presentation Slides, Motor Summit* (2014).
- [43] F. J. Ferreira, A. M. Silva, V. P. Aguiar, R. S. Pontes, E. C. Quispe e A. T. de Almeida. "Overview of Retrofitting Options in Induction Motors to Improve their Efficiency and Reliability". Em: (2011).
- [44] M. Barnes. *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*. Practical professional books from Elsevier. Elsevier Science, 2003. ISBN: 9780080473918.
- [45] C. International. *Variable frequency drives Energy Efficiency Reference Guide, Natural Resources Canada*. 2009. URL: <http://oee.nrcan.gc.ca/industrial/equipment/vfd-ref/pdf/variable-frequency-drives-eng.pdf>.
- [46] WEG. *Módulo 2 – Variação de Velocidade*. Accessed: 2018-07-30. 2007. URL: <https://wordpress.com/2012/08/weg-variacao3a7c3a3o-de-velocidade.pdf>.
- [47] J. Palma. *Accionamentos electromecânicos de velocidade variável*. Manuais universitários. Fundação Calouste Gulbenkian, Serviço de Educação, 1999. ISBN: 9789723108392.
- [48] G. Dubey. *Power semiconductor controlled drives*. Prentice Hall PTR, 1989. ISBN: 9780136868903.
- [49] M. C.e.a.d.I.R. C. Fernandes. *Medidas transversais de eficiência energética para a indústria*. 1ª ed. - [Lisboa] : Direção-Geral de Energia e Geologia. DGEG, 2016. ISBN: 978-972-8268-41-1.
- [50] J. Páscoa. *Turbomáquinas - Uma abordagem moderna*. Engebook, 2017. ISBN: 9789897232411.
- [51] E. M. Odinolfi e P. Saccenti. "Fan Performance: damper regulation and inlet whirl". Em: *Boldrocchi S.r.l., Biassono (MB) - Italy* (2011).
- [52] C. Gaspar. "Eficiência energética na indústria 6.ª parte - Variação Eletrónica de Velocidade". Em: *Eficiência energética e energias renováveis, o electricista, revista técnico-profissional* (2015), pp. 50–59. URL: https://www.voltimum.pt/sites/www.voltimum.pt/files/pdflibrary/pag._50-59.pdf.

- [53] S. Zhang e X. Xia. "Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors". Em: *Applied Energy* 88.9 (2011), pp. 3061 –3071. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.015>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911001723>.
- [54] G. B. P. Ltd, G. Tire e R. Company. *Handbook of Conveyor & Elevator Belting*. Godyear Tire e Rubber Company, 1976.
- [55] JIS. *Rubber belt conveyors with carrying idlers-Calculation of operating power and tensile forces*. 1992. ISBN: JIS B 8805.
- [56] J. C. C. Ribeiro Manuel Joaquim P.M. e Abrantes. "Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo". Em: *Cerâmica Industrial* (2001). URL: https://www.researchgate.net/publication/259582949_Moagem_em_Moinho_de_Bolas_Estudo_de_algunas_Variaveis_e_Otimizacao_Energetica_do_Processo.
- [57] F. Silva, W. Freire e M. Pilatasig. "Energy efficiency in the milling process of dehydrated products, using hammer mill". Em: *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*. 2016, pp. 1–8. DOI: [10.1109/ICA-ACCA.2016.7778492](https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2016.7778492).
- [58] WEG. *Guia de Aplicação para Bobinadores - CFW09 / PLC*. Accessed: 2018-07-30. 2013. URL: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-09-plc-guia-de-aplicacao-para-bobinadores-manual-portugues-br.pdf>.
- [59] A. I. Tselikov e V. V. Smirnov. *Rolling Mills*. Pergamon press, 1965.
- [60] J Denti Filho, B. Figueiredo e H Helman. "Modelamento e simulação do processo de bobinamento na laminação de tiras para aplicações de controle". Em: *Anais do VII Congreso Latinoamericano de Control Automático (VII CLCA)*. 1996, pp. 714–719.
- [61] F. Lima. "Modelagem, análise e controle de um sistema de bobinamento de tiras de aço". Tese de doutoramento. Master Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos–USP, São Carlos, 2001.
- [62] N. Mohan. *Electric Machines and Drives*. Wiley, 2011. ISBN: 9781118214480.
- [63] honeywell. *Variable Frequency Drive (VFD), APPLICATION GUIDE*. URL: <https://goo.gl/4k5JaH>.
- [64] DIRETIVA 2014/30/UE. *Harmonização da legislação dos Estados-Membros respeitante à compatibilidade eletromagnética (reformulação)*. DIRETIVA. União Europeia, 2014.

